

Projet d'Application Etudes Promotion 2012

Projet d'application n°257

Noms des élèves :

Daria Burot
Aurélien Fresneau
Lucas Glénat
Etienne Hodille
Alexis Tantot

Commanditaire :

Centrale Lyon Cosmos (club Fusée)

Tuteur(s) scientifique(s) :

Laurent Blanc
Frédéric Gillot
David Navarro

Conseiller en communication :

Nicolas Hourcade

Départements d'accueil :

MS-GM-GC
EEA

Date du rapport :

11/11/2011

Fusée expérimentale – Projet Zeppelin

Remerciements

La réalisation d'une fusée expérimentale est un projet qui nécessite beaucoup de matériel et de compétences que nous n'avons pas toujours. Pour cette raison, nous remercions vivement toutes les personnes qui nous ont aidés à construire Zeppelin, à savoir :

Nos tuteurs scientifiques pour leurs conseils, leurs idées et leur aide : M. Navarro, M. Gillot et M. Blanc. Notre conseiller en communication Nicolas Hourcade.

Lionel Charles et Bernard Jeanpierre qui ont consacré beaucoup de temps à la réalisation de nos pièces mécaniques. Frédéric Gillot à nouveau pour son aide sur la machine à commande numérique.

Jean-Baptiste Goure et Damien Constant pour nous avoir prêté du matériel et mis à disposition de l'outillage.

Le LMFA qui a gravé nos cartes électroniques.

Marie-Hélène Levé et Marie-Christine Havgoudoukian qui étaient toujours disponibles pour passer nos commandes.

Le BDE et le CLC qui ont financé une partie du projet.

Et enfin les membres de l'association Planète Sciences qui nous ont permis de réaliser ce projet, en nous proposant matériel et assistance, et nous donnant l'occasion formidable de lancer notre fusée fin août.

Table des matières

Sommaire

Remerciements	2
Table des matières	3
Table des figures.....	7
Introduction.....	9
Partie A : Présentation du projet.....	10
I. Fusées expérimentales : qu'est-ce ?.....	10
II. Commanditaires : Planète Sciences et son cahier des charges, le CNES, le CLC	10
II. 1. Le CLC.....	10
II. 2. Planète-sciences et le CNES.....	10
III. Pae : Suite des PE de l'an dernier. Présentation rapide de Hermès, ses expériences, sa qualification.....	11
III. 1. Une expérience acquise l'année dernière	11
III. 2. La fusée Hermès	11
IV. Zeppelin : ses expériences, ses objectifs.....	12
IV. 1. Naissance du projet.....	12
IV. 1. L'expérience principale de Zeppelin.....	12
IV. 3. Les objectifs secondaires.....	12
IV. 4. La gestion du temps	12
Partie B : Mécanique – Structure	13
I. Cahiers des charges et objectifs	13
I. a. Cahier des charges de Planète Sciences	13
I. b. Cahier des charges du projet et objectifs.....	13
I. c. Méthode de validation des cahiers des charges.....	14
I. Hermès en 2010 et Zeppelin en 2011.....	14
II. a. Une fusée modulable.....	14
II. b. La peau et la case moteur	18
II. c. Intégration de l'électronique	21
II. d. Les défis de l'expérience	22
II. d. 1 : Système de gonflage en vol	22
II. d. 2 : Système de séparation	22
III. Conception et fabrication détaillées	22
III. a. Case moteur.....	22
III. a. 1. Cahier des charges et fonction	22
III. a. 2. Bague de retenue et bague de centrage	24

.....	25
III. a. 3. Bague de poussée	25
III. a. 4. Ailerons	26
III. b. Case parachute-moteur et ballon	27
III. c. Module de séparation.....	28
III. c. 1. Fonction.....	28
III.c.2. Réalisation.....	28
III. d. Case pneumatique.....	28
III. d. 1. Fonction	28
III. d. 2. Réalisation du système d'ouverture de la vanne	29
III. d. 3. Réalisation du système de détachement	29
III. e. Case bouteille	31
III. e. 1. Fonction	31
.....	32
III. e. 2. Réalisation.....	32
III. f. Case parachute	33
III. f. 1. Cahier des charges et fonction	33
III. f. 2. Réalisation du réceptacle du parachute	33
III. f. 3. Système d'ouverture	34
III. f. 4. Dimensionnement et fixation du parachute	35
III. g. Case électronique	36
III. g. 1. Cahier des charges et fonction	36
III. g. 2. Choix d'intégration.....	36
III. g. 3. Réalisation technique	37
III. h. Coiffe	38
III. h. 1. Fonctions.....	38
III. h. 2. Choix de forme et de matière.....	39
III. h. 3. Bague de coiffe et assemblage avec la coiffe	39
IV. Conformité au cahier des charges de Planète Sciences	40
IV. a. Gabarit de la fusée	40
IV. b. Résistance mécanique.....	40
IV. c. Système de récupération.....	41
IV. d. Autres points du cahier des charges	41
V. Etat d'avancement de la partie mécanique	41
V. a. Structures réalisées à ce jour	41
V. b. ce qu'il reste à faire :	42
Partie C : Electronique embarquée sur la fusée Zeppelin	43
Introduction :	43
I. Définition du cahier des charges	43
I. a. Cahier des charges de Planète Sciences	43

I. b. Cahier des charges complémentaire	44
I. Conception de l'électronique	47
1. Aperçu général du système	47
a. Rappel des objectifs.....	47
b. Quelle architecture pour l'électronique ?	47
2. Constitution d'une carte électronique	48
Composants de base.....	48
Capteurs.....	49
Microcontrôleur	49
Liaison entre les cartes	49
Programmation.....	50
Relais.....	50
Découplage	51
Datasheet	51
3. Organisation spatiale de la case électronique	51
4. Architecture de la carte microcontrôleur.....	53
a. Liaison SPI	55
b. Capteurs	56
c. Contrôle	58
d. Communication	58
e. La mémoire.....	66
5. Gestion de la sécurité du vol	67
a. Instant d'apogée	67
b. Premier microcontrôleur : séquenceur Ballon.....	67
c. Deuxième microcontrôleur : séquenceur Parachute.....	68
d. Commande des servomoteurs	68
e. Isolation électrique du séquenceur parachute : utilisation d'optocoupleurs...	69
f. Jack de déclenchement	69
I. La réalisation des cartes électroniques	70
1. La conception des cartes	70
2. Les cartes tests	70
3. Réalisation des cartes finales	71
4. Programmation	72
Partie D : Campagne de lancement.....	74
1. Problèmes lors des contrôles	74
2. Lancement	74
3. Exploitation des résultats	74
Conclusion	75
Partie E : Autour de la réalisation de la fusée	77
I. Organisation au sein du projet	77

II. Budget	77
III. Communication	77
Conclusion	78
Annexes	79
Annexe 1 : Commanditaires et organismes autour du projet	80
Annexe 2 : Présentation des membres du projet.....	81
Annexe 3 : Diagramme Gantt	82
Annexe 4 : Budget	84
Annexe 5 : Cahier des charges de Planète Sciences pour les fusées expérimentales (extraits)	85
Annexe 6 : Fiche d'avancement du projet (suivi de Planète Sciences)	93
Annexe 7 : Dessins de définitions des pièces usinées à l'école	102
Annexe 8 : Dimensionnement des ailerons.....	116
Annexe 9 : Dimensionnement des parachutes.....	117
Annexe 10 : Le vol d'une fusée, trajectoire, stabilité	120
Annexe 11 : Schématique de la carte mère.....	122
Annexe 12 : Schématique de la carte d'alimentation	123
Annexe 13 : Typons des cartes électroniques	124
Annexe 14 : Dossier de sécurité	125

Table des figures

Figure 1 : Bagues de raccordement Hermès	14
Figure 2 : Fusée Zeppelin complète (sans ailerons) - découpage en cases	16
Figure 3 : Assemblage.....	17
Figure 4 : Bague femelle	17
Figure 5 : Bague mâle	18
Figure 6 : Structure interne et externe de la fusée Zeppelin	19
Figure 7 : Simulation de flèche à vide (tube encastré à une extrémité soumis à son poids) ...	20
Figure 8 : Flèche avec une masse l'extrémité.....	20
Figure 9 : Intégration de l'électronique sur Hermès	21
Figure 10 : intégration de l'électronique sur Zeppelin	22
Figure 11 : Architecture générale de la case moteur	23
Figure 12 : Vue d'ensemble de la case moteur	24
Figure 13 : bague de retenue et centrage	25
Figure 14 : Bague de poussée (dessus).....	25
Figure 15 : Bague de poussée (dessous).....	26
Figure 16 : Simulation sur bague de poussée.....	26
Figure 17 : Bague supérieure case parachute moteur	27
Figure 18 : Vanne haute pression avec raccords.....	29
Figure 19 : Quick-disconnect	30
Figure 20 : Quick-disconnect déconnecté	30
Figure 21 : assemblage système pneumatique	31
Figure 22 : Bouteille.....	32
Figure 23 : Assemblage case bouteille	32
Figure 24 : Bague inférieure case bouteille.....	33
Figure 25 : Bague supérieure case bouteille	33
Figure 26 : Assemblage case parachute	34
Figure 27 : Système d'ouverture	35
Figure 28 : Ouverture de la porte.....	35
Figure 29 : Bague inférieure case parachute.....	36
Figure 30 : Assemblage case électronique	37
Figure 31 : Gorge plastique pour les interrupteurs.....	38
Figure 32 : Bague de coiffe (dessus).....	39
Figure 33 : Bague de coiffe (dessous).....	39
Figure 34 : Définition de la flèche.....	41
Figure 35 : Coupleur de piles	48
Figure 36 : Chargeur - déchargeur numérique.....	48
Figure 37 : Centrale inertielle	49
Figure 38 : microcontrôleur PIC 18F252	49
Figure 39 : Connecteur HE10 mâle coudé.....	50
Figure 40 : Embase modulaire RJ12.....	50
Figure 41 : Relais.....	50
Figure 42 : condensateurs de découplage.....	51

Figure 43 : Case électronique fermée	52
Figure 44 : Case électronique ouverte	53
Figure 45 : Schématique environnement PIC.....	54
Figure 46 : Communication SPI.....	55
Figure 47 : Centrale inertielle	57
Figure 48 : Caméra FlyCamOne 2 éco.....	57
Figure 49 : ILS.....	58
Figure 50 : Chaîne de télémétrie.....	59
Figure 51 : Structure d'une trame	60
Figure 52 : Succession de trames	61
Figure 53 : Modulation FSK	61
Figure 54 : XR2206.....	62
Figure 55 : Schéma électrique du XR2206.....	63
Figure 56 : Le KIWI	64
Figure 57 : Fonctionnement du Kiwi.....	64
Figure 58 : zoom sur les connexions du Kiwi.....	65
Figure 59 : position des interrupteurs.....	65
Figure 60 : Mémoire EEPROM 1Mbit	66
Figure 62 : signal PWM	68
Figure 63 : optocoupleur	69
Figure 64 : Prise Jack mâle.....	70
Figure 65 : Platine de test.....	71
Figure 66 : Cartes finales en cours de programmation	72
Figure 67 : Schéma descriptif de l'ensemble du système	126

Introduction

La conquête du ciel, puis de l'espace au cours du siècle dernier fut pour l'homme la réalisation d'un rêve qui date de la nuit des temps et une avancée importante qui a bouleversé le monde des transports et des communications, entre autres. L'association Planète Sciences, en partenariat avec le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), permet à des étudiants de prendre part à ce rêve, en proposant et en encadrant des lancements de fusées expérimentales et de ballons sondes. C'est dans ce cadre que nous sommes en train de réaliser une fusée expérimentale d'environ deux mètres de haut, capable de voler jusqu'à 1500m d'altitude, répondant au nom de Zeppelin.

Le groupe de projet d'application d'études (PAe) que nous formons prend donc en charge la réalisation de la structure mécanique de la fusée (peau, ailerons, ...) ainsi que son électronique embarquée (expériences, télétransmission, ...). Les personnes qui composent le groupe sont issues des projets d'études de première année qui travaillaient sur la fusée expérimentale Hermès, dont le lancement a été reporté pour cause de mauvais temps lors de la campagne de lancement en août dernier.

Cette année, grâce aux savoirs et savoir-faire acquis précédemment, et aux découvertes faites lors de la campagne de lancement en août dernier auprès d'autres équipes, nous nous lançons donc sur un nouveau projet, dans le cadre de notre projet d'application de deuxième année. Les connaissances déjà en notre possession nous permettront de passer moins de temps sur les aspects techniques pour aller plus en avant sur notre expérience et notre démarche scientifique, et réaliser un travail d'une meilleure qualité, que ce soit dans le fond ou dans la forme.

Notre travail a commencé dès la rentrée en septembre 2011 et s'effectue régulièrement le mardi après-midi dans les créneaux attribués, mais aussi en grande partie chez soi, car c'est un projet qui demande beaucoup d'investissement, notamment du fait que nous avons une deuxième échéance (en plus de la soutenance finale) qui est la campagne de lancement au mois d'août.

Nous sommes en outre conseillés par nos tuteurs scientifiques et autres enseignants ou techniciens de l'école, qui donnent leur avis sur nos choix de conception et nous aident pour la fabrication des pièces.

Ce rapport final commencera par présenter le projet d'application et son contexte, puis explicitera le cahier des charges auquel nous devons répondre. Nous développerons ensuite les aspects théoriques et les solutions techniques retenues pour réaliser la fusée expérimentale - structure mécanique et électronique. Le rapport est destiné aux personnes qui ont encadré le projet tout au long de l'année, aux futurs élèves qui réaliseront une fusée expérimentale à l'école, à Planète Sciences et à quiconque y trouvera source d'inspiration.

Partie A : Présentation du projet

I. Fusées expérimentales : qu'est-ce ?

Une fusée expérimentale est un engin volant d'environ deux mètres de hauteur, dont la forme est la réplique à échelle réduite d'une véritable fusée. Cet engin pèse une dizaine de kilogrammes et atteint des hauteurs de 1000 mètres environ. Il est mis en mouvement par un propulseur à poudre qui nous est fourni par le CNES et sa structure doit être telle que la fusée se dirige bien vers le haut pendant le vol. Elle doit aussi comporter un parachute pour la récupération de l'engin après le vol.

En plus, une fusée expérimentale doit obligatoirement posséder une électronique embarquée dont le premier but est de réaliser une ou plusieurs expériences reposant généralement sur des mesures de différentes grandeurs physiques (vitesse, accélération,...) grâce à des capteurs. Le deuxième objectif de l'électronique embarquée est de garantir la sécurité du vol en déclenchant l'ouverture du parachute au bon moment.

II. Commanditaires : Planète Sciences et son cahier des charges, le CNES, le CLC

II. 1. Le CLC

Le commanditaire de notre projet est le club Fusée de l'Ecole Centrale de Lyon : Centrale Lyon Cosmos (ou CLC). Chaque année le club propose plusieurs projets d'études (3 depuis deux ans) de première année conduisant à la réalisation d'une fusée expérimentale. Cette année 15 élèves de première année réalisent donc leur fusée, nommée Stratos.

Notre projet, Zeppelin, est aussi commandité par le club.

Le club, où plusieurs élèves appartenant aux projets d'études sont investis, est une structure essentielle, car elle constitue l'interlocuteur avec Planète Sciences. De plus le club prend en charge une partie des dépenses du projet, en particulier celles qui ont lieu sur la campagne de lancement chaque année.

II. 2. Planète-sciences et le CNES

Planète-sciences est une association loi 1901, présente au niveau national, dont le but est la promotion des sciences auprès des jeunes. Elle est présente dans plusieurs secteurs : astronomie, robotique et espace. Dans cette optique, elle organise tous les ans depuis 1965 une campagne de lancement de fusées expérimentales et de ballons, et accompagne tout au long de l'année toute personne désirant réaliser sa propre fusée.

Planète Sciences met donc à notre disposition du matériel (par exemple l'émetteur présent dans la fusée) et organise des rencontres entre les clubs, des réunions de suivi des projets, des formations, et ce tout au long de l'année, en général en région parisienne.

Afin de garantir toute la sécurité nécessaire au lancement de fusées, le Centre National des Etudes Spatiales a été chargé par le ministère de l'intérieur de fournir aux clubs les propulseurs. Il s'agit de propulseurs à poudre permettant de lancer des fusées d'environ deux mètres de haut, pour une dizaine de kilogrammes en moyenne à une altitude d'environ 1000 mètres.

La mise à feu du propulseur demande la présence d'un pyrotechnicien, et la fusée doit subir de nombreux tests avant d'obtenir sa validation et donc son autorisation de vol. Elle doit pour cela répondre à un cahier des charges très précis, afin de garantir la sécurité de tous lors du lancement et durant la phase de vol.

Cette étape se déroulera lors de la campagne de lancement qui aura lieu à la fin du mois d'août 2011 au Centre d'Essai des Landes (CELM) à Biscarosse. A cette occasion tous les membres des projets réalisant une fusée expérimentale se rendront là-bas pendant une semaine.

III. Pae : Suite des PE de l'an dernier. Présentation rapide de Hermès, ses expériences, sa qualification

III. 1. Une expérience acquise l'année dernière

Les cinq élèves que nous sommes faisons partie des Projets d'études dont l'objectif était l'optimisation et la fiabilisation de la fusée expérimentale réalisée chaque année à l'Ecole Centrale de Lyon. L'expérience formidable que nous avons vécue nous a donné l'envie de continuer cette année en formant un groupe de PAe. Nous pensions à juste titre que forts des connaissances et techniques acquises l'année dernière, nous pourrions construire une nouvelle fusée plus ambitieuse tout en étant moins contraints par la gestion du temps, qui fut difficile en première compte tenu de notre faible expérience dans le domaine. De plus, nous voulions avoir une deuxième chance de lancer Hermès, notre fusée de l'année dernière qui malgré sa qualification n'avait pu être lancée en raison des conditions météorologiques.

III. 2. La fusée Hermès

Hermès a été réalisée par trois projets d'études, le premier travaillant sur la structure mécanique, le deuxième sur l'électronique et le troisième sur un CanSAT, mini-satellite de la taille d'une canette éjecté de la fusée pendant le vol et chargé de mener des expériences en redescendant sous parachute.

L'expérience principale, raison d'être d'Hermès, était donc la validation de l'éjecteur de CanSAT réalisé en 2008 par un projet d'études avec l'éjection d'un véritable CanSAT. En outre, Hermès apportait certaines innovations structurales (système de cases indépendantes) et embarquait des expériences secondaires réalisées par l'électronique embarquée (détection d'apogée par gyroscopie, mesure de vitesse, ...).

Nous fûmes une quinzaine d'étudiants à aller à la campagne de lancement pour concrétiser sa réalisation mais comme dit plus haut un vent trop fort le dernier jour nous empêcha de la lancer, et reporta donc son lancement à cette année, où nous lancerons une deuxième fusée, celle qui fait l'objet du présent rapport et sur laquelle nous travaillons depuis un an : Zeppelin.

IV. Zeppelin : ses expériences, ses objectifs

IV. 1. Naissance du projet

Le projet est né à l'issue de la campagne de lancement de l'année dernière, où nous n'avions pu lancer Hermès. Nous voulions continuer à évoluer dans le monde de l'aérospatial et la décision de continuer en PAe s'est rapidement imposée à nous. Cependant retravailler sur Hermès, qui était qualifiée et qui ne pouvait donner matière qu'à quelques améliorations, ne nous paraissait pas suffisant, et pas assez ambitieux. Nous avons donc décidé de concevoir une nouvelle fusée, mais sans repartir de zéro, en s'appuyant sur le travail que nous avons réalisé. Notre nouvelle fusée devait aussi nous permettre d'aller plus loin dans notre travail, de découvrir de nouvelles choses. C'est pourquoi nous sommes partis sur une fusée bien différente de la précédente.

IV. 1. L'expérience principale de Zeppelin

Nous voulions réaliser une expérience innovante, jamais réalisée, qui présente un réel intérêt scientifique et qui soit aussi un défi technique. L'expérience de Zeppelin est le gonflage puis l'éjection d'un ballon d'hélium au cours du vol. Cela nous permet d'envisager des expériences à plus long terme que ne le permet un CanSAT, car le ballon restera à altitude constante pendant plusieurs heures alors que le CanSAT descend rapidement au sol sous son parachute. C'est aussi un défi qui impose des contraintes techniques fortes car la procédure est complexe, et constitue donc une expérience en lui-même.

Le ballon sera doté d'une électronique le transformant en mini-station météo, et sera capable de transmettre au sol les données recueillies.

IV. 3. Les objectifs secondaires

En plus des objectifs dictés par notre expérience, nous avons la volonté d'innover sur certains points (structure ou électronique) ou de confirmer des choix de l'année dernière. Nous avons ainsi plusieurs objectifs secondaires, sur lesquels on reviendra dans la suite du rapport : peau porteuse, système de cases indépendantes, peau transparente, détection d'apogée plus efficace, ...

IV. 4. La gestion du temps

Un point faible du projet Hermès de l'an dernier fut la gestion du temps. En effet, partant de zéro ou presque, et vu l'ampleur du travail à effectuer, nous avons mal géré notre temps et avons fini la fusée très en retard, certains éléments ayant même été montés pendant la campagne de lancement. Nous avons donc voulu cette année être plus efficaces, en définissant mieux notre planning, ce qui était possible au vu de l'expérience que nous avons désormais. Nous avons aussi tâché d'établir un meilleur contact avec Planète Sciences en étant plus présents aux rencontres entre clubs, réunions d'avancement (voir feuille d'avancement en annexe 6) et autres points clés du suivi du projet.

Partie B : Mécanique – Structure

La structure de la fusée doit être conçue de façon à atteindre un double objectif : accueillir et permettre la mise en œuvre de l'expérience choisie, et respecter les conditions du cahier des charges de Planètes Sciences pour la sécurité des participants à la campagne. De nombreux choix faits ici découlent directement de ce cahier des charges et des choix faits sur la fusée Hermès de l'an passé. Nous commencerons ici par développer les différents cahiers des charges que nous devons respecter ainsi que les objectifs fixés, puis nous expliciterons la conception et la fabrication de la structure.

I. Cahiers des charges et objectifs

I. a. Cahier des charges de Planète Sciences

Pour la partie mécanique, le cahier des charges de Planète Sciences se découpe en trois points : sécurité des participants, intégrité de la fusée au cours du vol et mécanique du vol optimale. L'intégralité de ce cahier des charges, pour la partie mécanique, se trouve en annexe 5. Nous nous contenterons ici d'en faire un bref résumé.

- Sécurité des participants : Celle-ci est garantie principalement par le système de récupération de la fusée, c'est-à-dire son parachute, voire ses parachutes comme c'est notre cas. Ils doivent être dimensionnés correctement, de façon à assurer l'arrivée au sol en bon état des deux parties de la fusée sans qu'elles soient déportées par le vent lors de leur phase de descente. La méthode de dimensionnement de ces parachutes est donnée par Planètes Sciences et est développée en annexe 9.
- Intégrité de la fusée au cours du vol : Le gabarit de la fusée est déterminé à la fois par ses caractéristiques dimensionnelles qui doivent rester dans des intervalles bien définis (par exemple, sa finesse), et par sa résistance mécanique (par exemple, sa flèche). On trouvera, toujours dans l'annexe 9, la totalité de ces conditions. La fusée doit de plus être compatible avec les différents éléments fournis par Planète Sciences, comme la rampe de lancement ou le moteur.
- Mécanique du vol optimale : La stabilité générale de la fusée sera vérifiée à l'aide de trois logiciels fournis par Planète Sciences (*Trajec*, *Trajecto* et *Stabilito*). Notamment, le dimensionnement et la résistance mécanique des ailerons sont très importants pour assurer un vol dans les meilleures conditions. On pourra également se référer utilement à l'annexe 10 qui présente les grands principes de la mécanique du vol d'une fusée.

De nombreux autres points concernant, entre autres, le système électronique de la fusée doivent être pris en compte. Ceux-ci sont rappelés dans la partie concernant l'électronique de la fusée du présent rapport.

I. b. Cahier des charges du projet et objectifs

En plus des conditions imposées par Planète Sciences, l'expérience que nous avons choisie pour notre projet nous ajoute deux autres points à respecter.

- Système de gonflage : la fusée doit intégrer un système permettant le gonflage, rapide et à haute altitude d'un ballon d'hélium.
- Ejection du ballon : afin de permettre l'éjection du ballon, la fusée devra se séparer en deux parties. La partie inférieure retombera au sol pendant que l'autre devra gonfler le ballon et l'éjecter avec sa nacelle. Ce point nécessite une dérogation de la part de Planète Sciences puisque, dans son cahier des charges, ceux-ci demandent qu'aucune partie de la fusée ne se détache au cours du vol.

Bien sûr, ces deux systèmes se doivent de respecter le cahier des charges de Planètes Sciences.

I. c. Méthode de validation des cahiers des charges

Afin de vérifier que la totalité des points du cahier des charges sont bien respectés et ce, tout au long du projet, nous avons principalement utilisé la méthode des éléments finis à l'aide du module « Structural Analysis » de Catia V5. Ceci nous a permis de vérifier que les choix faits pour l'intégralité de la structure de la fusée étaient valides concernant la résistance mécanique.

La vérification de la plupart des conditions sont développés dans la suite.

I. Hermès en 2010 et Zeppelin en 2011

Sont explicités ici les différents éléments de la fusée de l'an dernier que nous avons optimisés cette année. Le travail réalisé sur la fusée Hermès, ainsi que la nouvelle expérience choisie cette année, nous ont guidés vers un certain nombre d'objectifs à atteindre, qui sont donnés ici.

II. a. Une fusée modulaire

L'un des points importants qui a été mis en place l'an dernier consistait à mettre en place un moyen de séparer, pendant la fabrication de la fusée, ses différentes parties. En effet, à chacune des fonctions de la fusée, nous avons associé une 'case' contenant les éléments nécessaires à son bon fonctionnement (voir figure 2). Deux cases étaient jointes entre elle par un système de bague, une bague étant constituée de deux parties (une mâle, une femelle, voir figure 1).

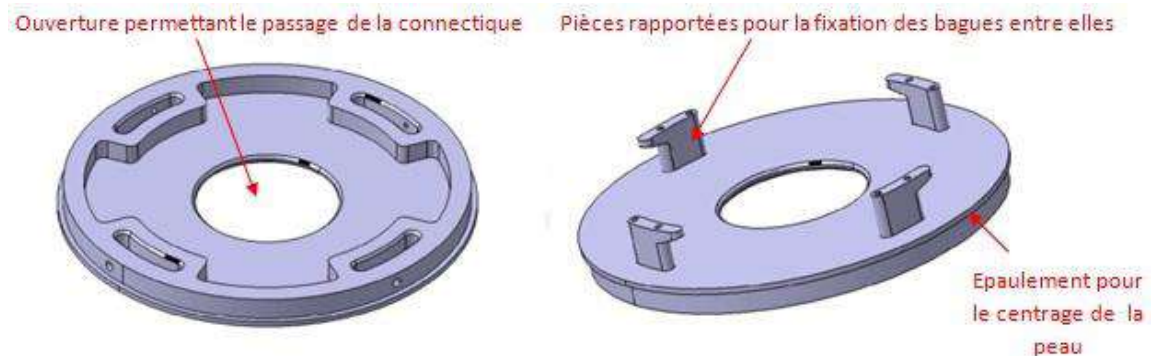


Figure 1 : Bagues de raccordement Hermès

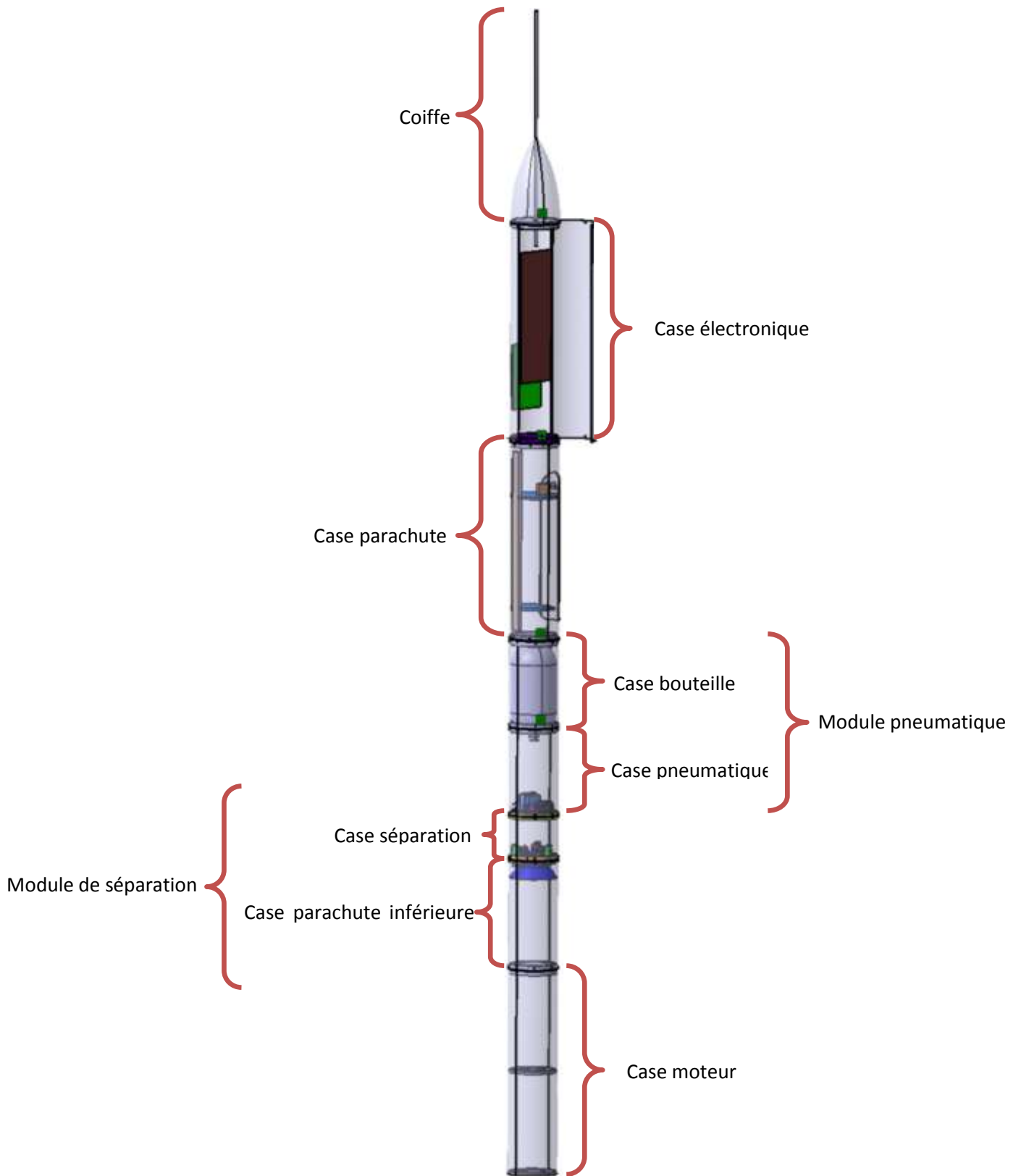


Figure 2 : Fusée Zeppelin complète (sans ailerons) - découpage en cases

Il nous est apparu important de garder ce système modulaire. En effet, lors du montage final de la fusée, de nombreux ajustements ont dû être faits pour assurer l'intégration des divers éléments internes. Ainsi, nous avons eu la possibilité de travailler chacun sur une case sans être tous ensemble sur la fusée, ce qui aurait posé des problèmes d'organisation.

Le système général des bagues doubles a donc été conservé, mais grandement simplifié. En effet, celles de l'an dernier comportaient des hyperstatismes très importants qui nous avaient forcés à limer longuement diverses parties pour les faire rentrer les unes dans les autres.

Pour cela, nous avons cette année fait le choix d'un centrage court sur le diamètre (voir figure 3). Cette solution a l'avantage d'être très simplement usinée au tour conventionnel, ce qui évite le recours à la machine à commande numérique, souvent peu disponible au cours de l'année.



Figure 3 : Assemblage



Figure 4 : Bague femelle



Figure 5 : Bague mâle

Les bagues présentées en figures 4 et 5 (ont été la base de conception. Elles ont ensuite été adaptées à chacune des cases en fonction des besoins. On trouvera dans la suite (détail de la conception case par case) les bagues correspondantes.

II. b. La peau et la case moteur

L'un des points cruciaux lors de la campagne de lancement est la mise en place du moteur par les pyrotechniciens de Planètes Sciences. L'an dernier, nous avons fait le choix de ne pas mettre de peau sur la case moteur, ce qui leur a permis d'avoir une parfaite visibilité lors de l'insertion du moteur dans son emplacement. Toutefois, ceci réduisait notablement l'aérodynamisme global de la fusée.

Pour contrer ce problème, nous avons cette année décidé d'utiliser une peau transparente, en polycarbonate. Cela nous permet d'optimiser les performances de la fusée au cours de son vol en gardant un diamètre constant tout le long de celle-ci, tout en donnant le maximum de sécurité aux pyrotechniciens.

Nous avons de plus fait le choix de réaliser une peau porteuse, c'est-à-dire une peau qui supportera toute la structure de la fusée, à la différence de ce qui a été réalisé l'an dernier (voir figure 6). Cette solution nous permet de diminuer grandement le diamètre de la fusée, par rapport à ce que serait une structure avec une peau non porteuse. Nous obtenons ainsi une masse globale bien réduite. Cela permet aussi de diminuer le nombre de pièces à concevoir (et donc à usiner).

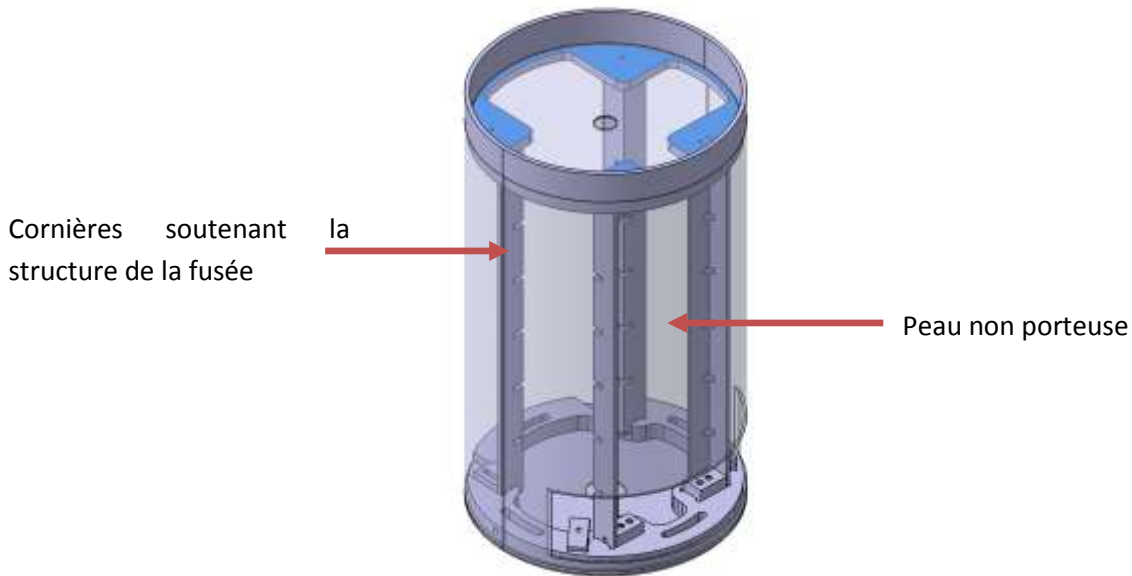


Figure 6 : Structure interne et externe de la fusée Zeppelin

Compte tenu des expériences réalisées dans la fusée et des disponibilités des fournisseurs, nous avons alors pu choisir le diamètre adéquat le plus faible possible, soit 114 mm intérieur et 120 mm extérieur.

Le polycarbonate est un polymère thermodurcissable utilisé couramment en aéronautique et automobile, avec une limite d'élasticité de l'ordre de celle de l'aluminium et un module d'Young des plus hauts parmi les polymères. C'est le polymère transparent capable de résister aux contraintes les plus élevées. A l'aide du module « Structural Analysis » de Catia V5, nous avons pu modéliser la peau (ici un tube de 2m) par éléments finis afin de calculer sa flèche (à vide et sous un chargement de 10 N, comme précisé dans le cahier des charges de Planète Sciences, voir figures 7 et 8). Nous pouvons observer une flèche à vide de 0,225%, bien largement inférieure au 1% autorisé. Avec une masse de 1kg attachée au bout, on est à 0,475%, la limite du cahier des charges étant à 1% de la longueur en plus. Sachant que cette modélisation ne prend pas en compte la rigidité supplémentaire obtenue grâce aux bagues entre les cases, on en conclut que le matériau choisi pour la peau remplit le cahier des charges pour ce qui est de la flèche, même si on rajoute les éléments internes à la fusée qui ne sont pas les principaux facteurs de masse par rapport à la peau et aux bagues.

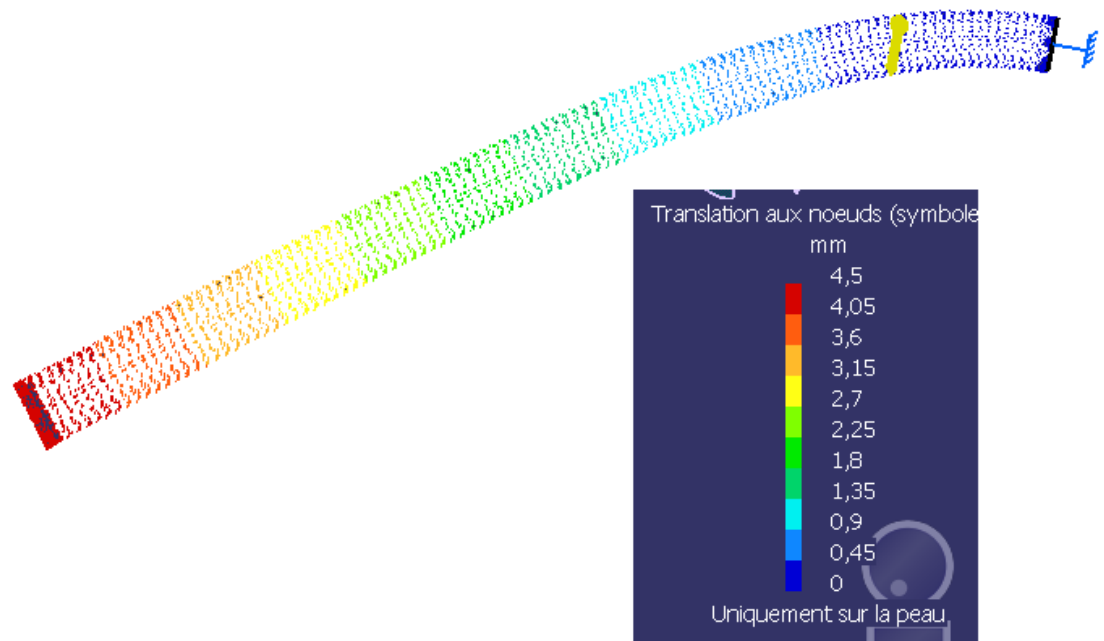


Figure 7 : Simulation de flèche à vide (tube encastré à une extrémité soumis à son poids)

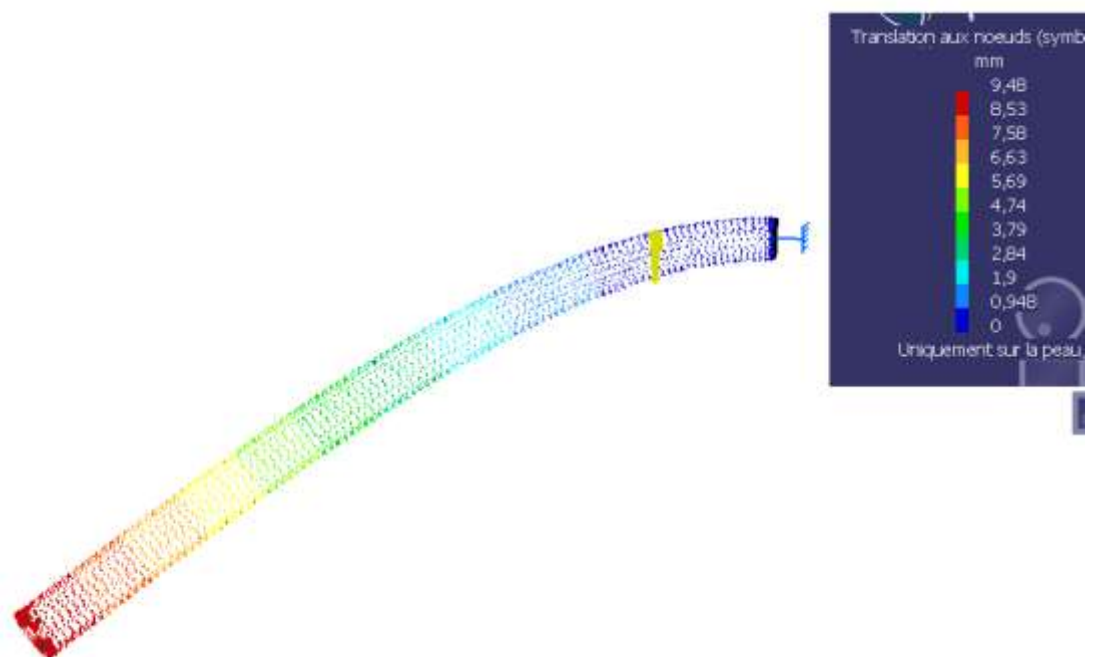


Figure 8 : Flèche avec une masse l'extrémité

II. c. Intégration de l'électronique

La partie électronique de la fusée demande en elle-même un certain nombre de conditions. En effet, il faut avoir la possibilité d'accéder aux cartes une fois intégrées dans la fusée, ainsi qu'aux batteries pour les recharger, souvent plusieurs fois lors des phases de tests. L'an dernier, nous avons choisi une architecture comportant une carte principale, verticale, sur laquelle venaient se ficher plusieurs cartes horizontales comportant les composants principaux (voir figure 9). Ce montage, bien qu'esthétique, nous a posé de nombreux problèmes, en particulier lors de la campagne de lancement : il était très difficile d'enlever/remettre la peau et donc d'accéder aux cartes et aux batteries, ce qui nous a fait perdre un temps précieux.

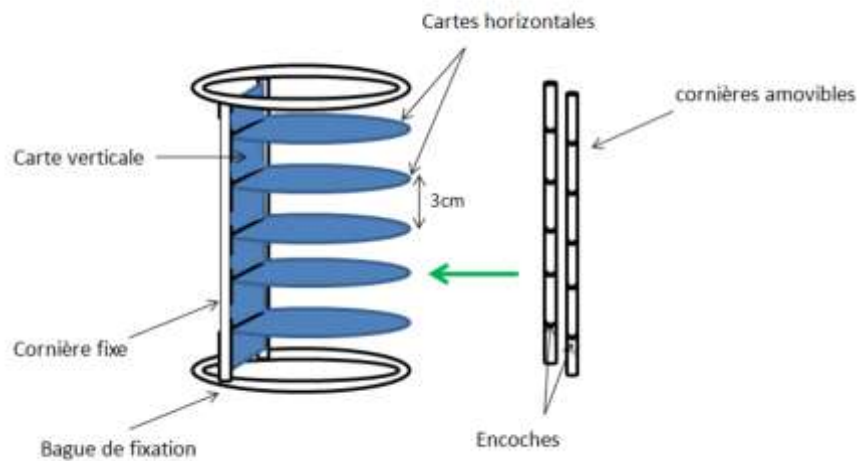


Figure 9 : Intégration de l'électronique sur Hermès

Nous avons donc décidé cette année d'abandonner complètement ce système, y préférant un système de cartes montées sur charnières pour un accès facile, même lorsque la fusée est intégralement montée (voir figure 10).

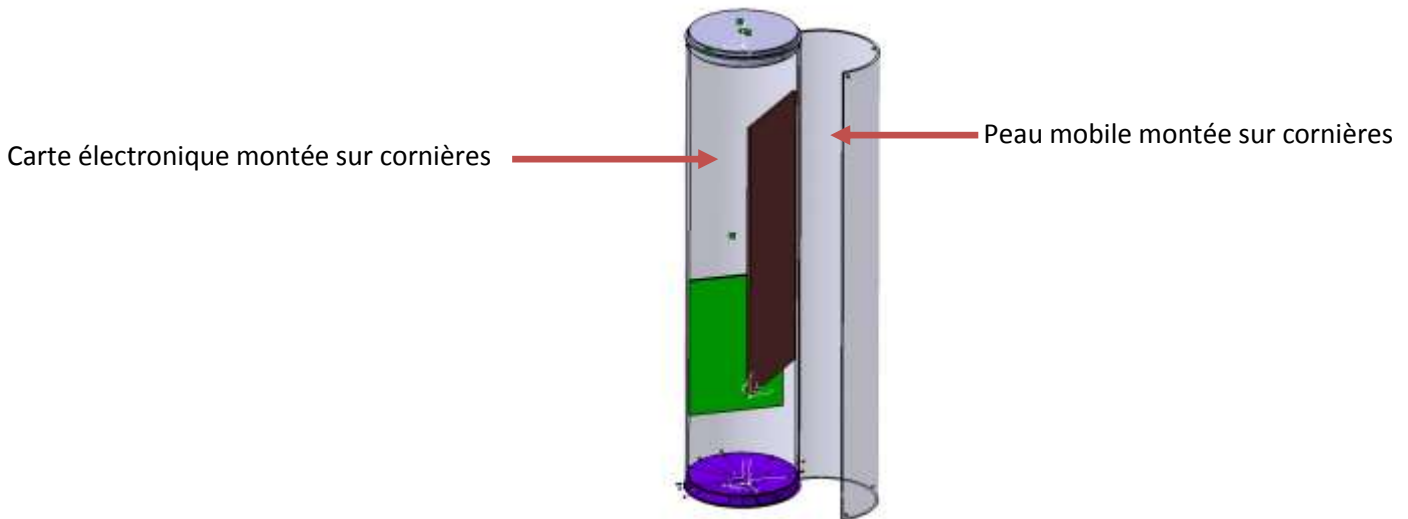


Figure 10 : intégration de l'électronique sur Zeppelin

II. d. Les défis de l'expérience

II. d. 1 : Système de gonflage en vol

Pour réaliser l'expérience choisie, à savoir gonfler un ballon puis l'éjecter, le tout en altitude, il nous a fallu choisir un matériel adapté. Au vu de ce qui avait déjà été fait en terme de système pneumatique dans les fusées expérimentales, nous avons choisi d'utiliser un matériel de type Paintball. En effet cette discipline utilise des systèmes comprimés haute pression mais au poids réduit à cause de leur côté portable. Nous avons complété ce matériel avec du matériel certifié haute pression quand c'était nécessaire.

II. d. 2 : Système de séparation

Le fait de séparer la fusée en deux parties pour éjecter le ballon constitue un réel défi. En effet, réaliser un système fiable, cela signifie que la fusée doit se diviser en deux rapidement et au moment voulu, mais aussi et surtout que la fusée ne se sépare pas n'importe quand pendant le vol sous l'effet des contraintes mécaniques.

III. Conception et fabrication détaillées

Nous présentons ici les choix de conception et de réalisation pour chacune des cases de la fusée. Les dessins de définitions des pièces à usiner se trouvent en **annexe XX** du présent rapport.

III. a. Case moteur

III. a. 1. Cahier des charges et fonction

La case moteur est, comme son nom l'indique, la partie qui va accueillir le moteur à poudre fourni par Planète Sciences, une fois la fusée en rampe. Sa réalisation doit donc être faite avec soin, puisqu'elle met en jeu la sécurité des pyrotechniciens de l'association et des participants à la

campagne. Le cahier des charges de Planète Sciences réfère pour cette partie à son « *Cahier des propulseurs* ». On se pourra se référer utilement à l'annexe 9 du présent rapport pour les détails.

En particulier, Planète Sciences défini une architecture globale obligatoire pour la case (voir figure 11)

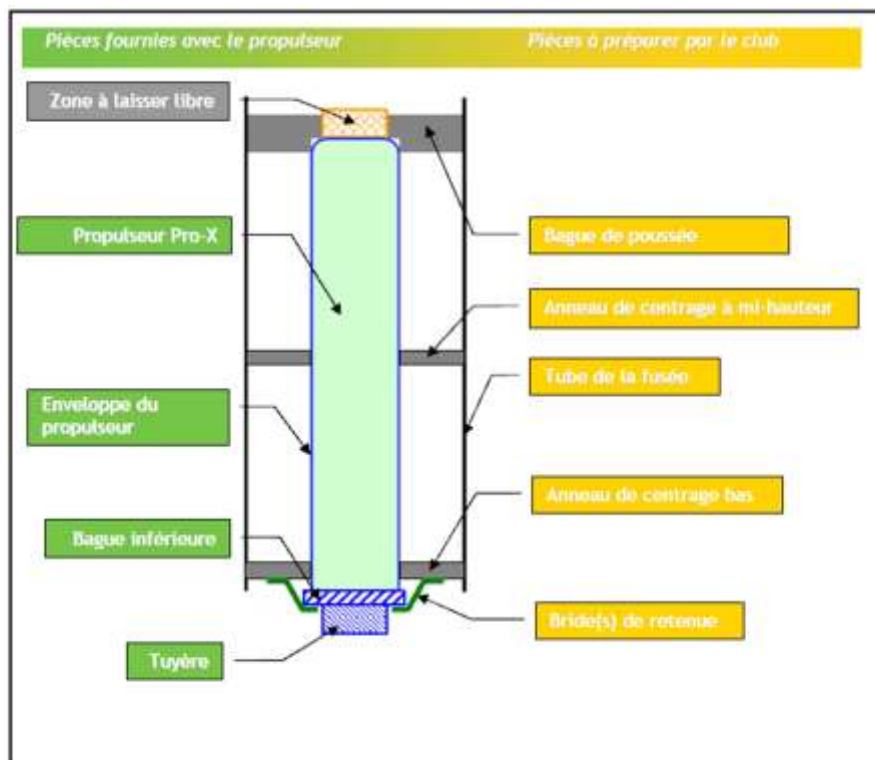


Figure 11 : Architecture générale de la case moteur

Il est donc à notre charge de réaliser les trois bagues qui vont accueillir le moteur. Celles-ci se divisent en deux catégories : la bague de retenue et la bagues de centrage d'une part, et la bague de poussée de l'autre. Pour le diamètre des alésages, Planète Sciences demande un jeu fonctionnel compris entre 0,5 et 1mm pour un diamètre de moteur nominal de 54mm.

Sur cette case viennent également se fixer les ailerons qui servent à stabiliser le vol afin d'éviter que la fusée ne tourne sur elle-même.

Une vue d'ensemble de la case est donnée en figure 12.

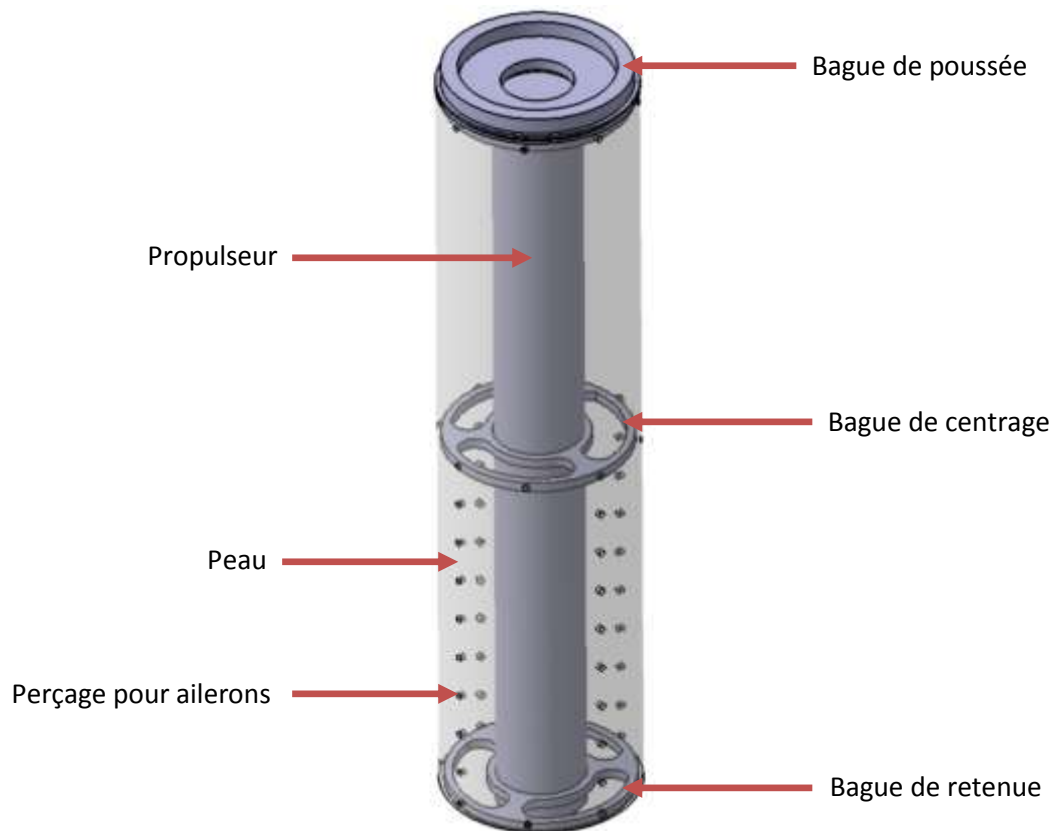


Figure 12 : Vue d'ensemble de la case moteur

III. a. 2. Bague de retenue et bague de centrage

La bague de retenue permet comme son nom l'indique de retenir le moteur une fois celui en position. Elle participe à son placement correct, de même que la bague de centrage qui permet, elle de guider le moteur dans sa position. Ces deux bagues ne subissent donc pratiquement aucune contrainte, ni pendant le décollage ni pendant le vol.

Pour ces raisons, ces deux bagues ont été conçues de la même façon : deux disques d'aluminium d'épaisseur 6 mm (la plus faible possible compte tenu de la taille des vis choisies pour les fixer sur la peau), avec un alésage de diamètre 55 mm au centre et des ouvertures pour alléger la pièce (voir figure 13 pour une vue 3D, et annexe 7 pour les dessins de définition).

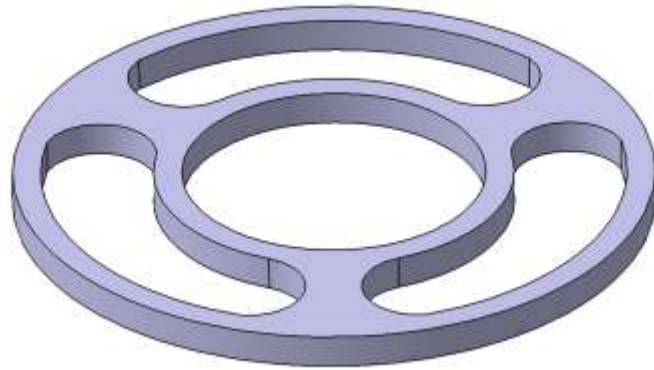


Figure 13 : bague de retenue et centrage

III. a. 3. Bague de poussée

Cette bague, située tout en haut de la case moteur, doit être conçue avec soin car c'est celle qui subit le plus de contraintes au décollage. Elle prend en effet toute l'impulsion du moteur, soit près de 1000 N sur une durée de quelques secondes. Elle doit donc être suffisamment épaisse pour supporter le choc afin de transmettre la poussée au reste de la fusée sans se briser, tout en restant avec un poids le plus faible possible.

Cette bague a été réalisée deux fois. L'avantage principal de la première version était son poids, très léger, pour une résistance tout à fait suffisante à la poussée du moteur. Toutefois, les ouvertures permettant la légèreté de la pièce mettaient en danger les composants situés juste au-dessus de la case (en particulier, le parachute de la partie inférieure et le ballon avec sa nacelle). Nous avons donc préféré à cela une bague fermée, mais moins épaisse (voir figures 14 et 15). Le rapport poids/résistance à la poussée est nettement moins intéressant, mais les parties supérieures de la fusée sont complètement protégées.

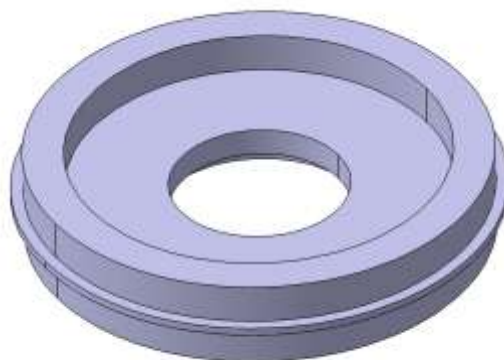


Figure 14 : Bague de poussée (dessus)

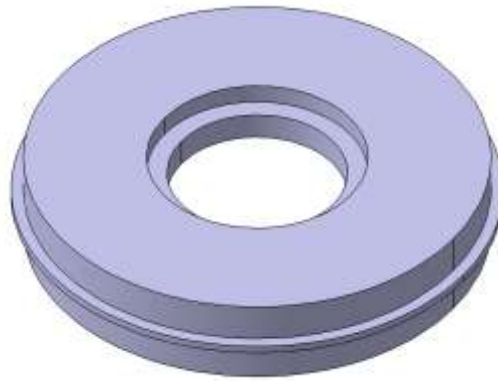


Figure 15 : Bague de poussée (dessous)

Pour vérifier la résistance de cette pièce à la poussée du moteur, nous avons utilisé la méthode des éléments finis avec le module « Structural Analysis » de Catia. Les résultats de la simulation sont donnés en figure 16. On obtient une contrainte de Von Mises maximale de 5 MPa, soit bien en dessous de la limite d'élasticité de l'aluminium (entre 95 et 165 MPa selon les alliages). Nous avons donc pu valider cette pièce.

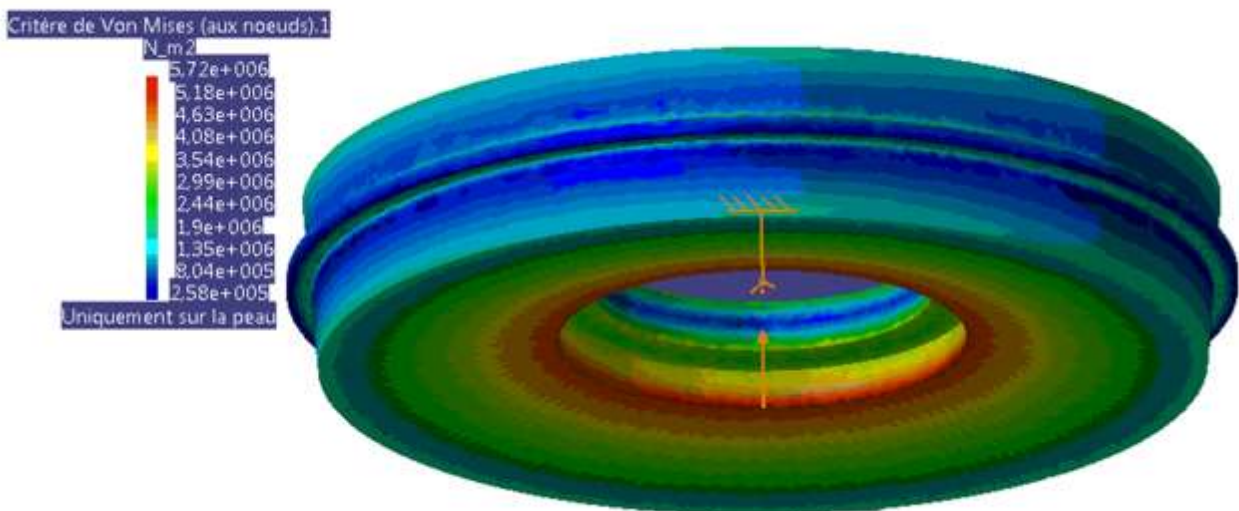


Figure 16 : Simulation sur bague de poussée

III. a. 4. Ailerons

Le rôle des ailerons est de stabiliser la fusée au cours de son vol, afin d'une part de l'empêcher de tourner sur elle-même, ce qui réduirait ses performances, et d'autre part de dévier de sa trajectoire, ce qui pourrait être dangereux. Des ailerons bien dimensionnés permettent de garantir le retour à la position d'équilibre de la fusée en cas de déviation. Dans le cas contraire, deux types de comportement peuvent survenir : une fusée instable (ailerons trop petits) se mettra en rotation, réalisant des « loopings » avant de s'écraser. Une fusée surstable (ailerons trop grand) oscillera en permanence autour de sa position d'équilibre. Voir annexe 10 pour la théorie sur le vol d'une fusée.

Afin de réaliser le dimensionnement des ailerons, Planète Sciences met à notre disposition deux logiciels, *Stabilito* et *Trajec*. Ceux-ci sont d'ailleurs utilisés lors de la phase de test pour vérifier la stabilité de la fusée. Le dimensionnement complet des ailerons pourra être trouvé en annexe 8 du présent rapport.

Par ailleurs, les ailerons doivent vérifier un certain nombre de conditions mécaniques du cahier des charges, que l'on pourra retrouver en annexe 5. Nous avons choisi de les réaliser en aluminium, à partir de plaque d'épaisseur 2 mm. Ils seront fixés sur la fusée au moyen de barre à profilé en T, visées dans la peau de la case moteur. Les raisons de ce choix sont à la fois la sûreté de la méthode, qui a déjà été réalisée sur d'autres fusées du club par le passé, et notre budget. Le club avait en effet déjà fait l'acquisition de quatre plaques d'aluminium l'an dernier, qui n'avaient pas été utilisées.

III. b. Case parachute-moteur et ballon

Cette case est la plus haute de la partie inférieure de la fusée. Elle contiendra au fond, le parachute de la case moteur, qui sera fixé à la bague de poussée au moyen d'un anneau vissé. Juste au-dessus se trouveront le ballon et sa nacelle. Le gonflage du ballon se fera par l'intermédiaire d'un tuyau, passant par le trou de la bague supérieure de la case (voir figure 17).



Figure 17 : Bague supérieure case parachute moteur

Le dimensionnement du parachute doit être fait avec soin. Il doit en effet garantir que la case moteur arrive au sol en bon état, tout en assurant une descente suffisamment rapide pour ne pas dévier sous l'effet du vent. Planète Sciences nous fournit là aussi un calcul de dimensionnement, que l'on pourra retrouver en annexe 9.

Le parachute nécessaire à la bonne récupération de la partie moteur doit donc être un parachute de surface $0,58 \text{ m}^2$, soutenu par au moins deux suspentes.

III. c. Module de séparation

III. c. 1. Fonction

Nous avons décidé de séparer notre fusée en deux parties lors du largage du ballon. La fonction de cette case sera d'assurer cette séparation. Il s'agit de trouver un moyen simple, efficace et peu volumineux pour réaliser cette action. La solution retenue permet de dissocier la fusée en deux au-dessus de la case moteur et en dessous de la case pneumatique.

III.c.2. Réalisation

Pour garantir l'intégrité de la fusée avant la séparation, trois tiges verticales sont fixées à la bague supérieure de la case moteur, et viennent s'emboîter dans trois trous situés dans la bague inférieure de la case pneumatique. Ces trois tiges sont percées horizontalement, de sorte que trois goupilles viennent les maintenir en position en se bloquant dans ces trous. Ces goupilles sont maintenues dans les trous des tiges verticales grâce à des ressorts, et en sont retirées au moment de l'éjection par un unique servomoteur. Grâce à ce système, ce sont les ressorts des goupilles qui assurent que la fusée reste intègre. Ainsi, en cas de défaillance du servomoteur, la fusée ne se séparera certes pas, mais elle ne risque pas de se séparer à n'importe quel moment du vol, ce qui est beaucoup plus dangereux. Pour assurer une séparation rapide, des ressorts, sont placés entre les deux bagues qui se séparent. Ainsi, le bloc propulseur est repoussé par ces ressorts au moment où les goupilles sont retirées par le servomoteur.

Il est impératif de mettre au moins trois tiges pour s'assurer que la fusée ne ploiera pas en cas de fortes contraintes de flexion. En effet, il y a des chances de créer un jour entre les bagues en cas de forte flexion si l'on n'utilise que deux tiges. Cette solution avait été initialement envisagée par souci de simplicité, mais l'ajout d'une troisième tige était indispensable.

La bague inférieure de la case pneumatique étant la plus complexe à réaliser, puisqu'elle contient les trous laissant passer les tiges verticales, des trous pour accueillir les ressorts facilitant la séparation, un trou ajusté à la taille du servomoteur pour le fixer, des trous laissant passer le système pneumatique, elle est usinée à l'aide de la machine à commande numérique. Cela permet également de profiter de cette dernière pour éviter au maximum la bague pour gagner du poids.

Au moment de la séparation, la case moteur doit déployer son parachute. Ceci doit se faire uniquement de manière mécanique puisqu'on ne peut intégrer facilement de l'électronique dans le bloc moteur qui se sépare. Le parachute est donc simplement poussé à travers la bague supérieure de la case moteur au moment de la séparation grâce à des ressorts placés sur la bague de poussée. Le parachute est guidé par un entonnoir en plastique à travers la bague supérieure de la case moteur pour éviter qu'il ne se coince au moment de son éjection.

III. d. Case pneumatique

III. d. 1. Fonction

Cette case a pour but de soutenir 2 systèmes indispensables à l'expérience. Le premier de ces systèmes est celui qui permettra l'ouverture de la vanne du circuit pneumatique reliant la bouteille

au reste du circuit. Ceci permet le gonflage du ballon en hélium. Le deuxième système est le système de séparation qui permettra de dissocier le ballon de la bouteille.

III. d. 2. Réalisation du système d'ouverture de la vanne

Le principal problème pour ce système a été de trouver un ensemble vanne moteur qui soit facilement utilisable, léger et peu coûteux. Par exemple, nous aurions pu utiliser un système servomoteur à faible couple et vanne mais le moteur n'aurait pas pu ouvrir la vanne. A l'opposé, nous aurions pu choisir une électrovanne. L'inconvénient est que celles-ci sont lourdes, volumineuses et coûteuses. Nous avons donc choisi un système servomoteur et vanne avec un servomoteur capable de délivrer un couple suffisant pour ouvrir la vanne (figure 18). Pour maintenir la vanne sur la bague, il a fallu imaginer une cale à la forme de cette vanne pour permettre au système de fonctionner.



Figure 18 : Vanne haute pression avec raccords

III. d. 3. Réalisation du système de détachement

Pour séparer le ballon de la bouteille nous avons choisi un mécanisme présent sur de nombreux systèmes et qui a fait ses preuves (figure 19). Dans ce système, nous avons choisi de séparer toute une section du circuit pneumatique avec le ballon afin de ne pas concentrer les systèmes à un même endroit pour ne pas déplacer le centre de gravité de son point optimal. Ainsi, lors de la séparation et du largage du ballon, un tuyau d'environ 20 cm est largué avec le ballon.



Figure 19 : Quick-disconnect



Figure 20 : Quick-disconnect déconnecté

Pour séparer la partie mobile (reliée au ballon) du circuit pneumatique de la partie fixe (par rapport à la fusée) nous avons utilisé un système de plaque poussoir guidée en translation par trois tiges. L'actionneur est un servomoteur du même type que celui cité précédemment dans le III.e.2 qui lors de sa rotation, grâce à une came appuyer sur la plaque, permettra l'abaissement de la cale et ainsi le détachement des deux parties de tuyauterie.

Nous avons donc décidé d'utiliser deux servomoteurs de même type pour les deux systèmes. Ces deux servomoteurs seront tenus sur la bague grâce à une cale en U en plastique thermoformé et seront l'un au-dessus de l'autre pour un gain de place.

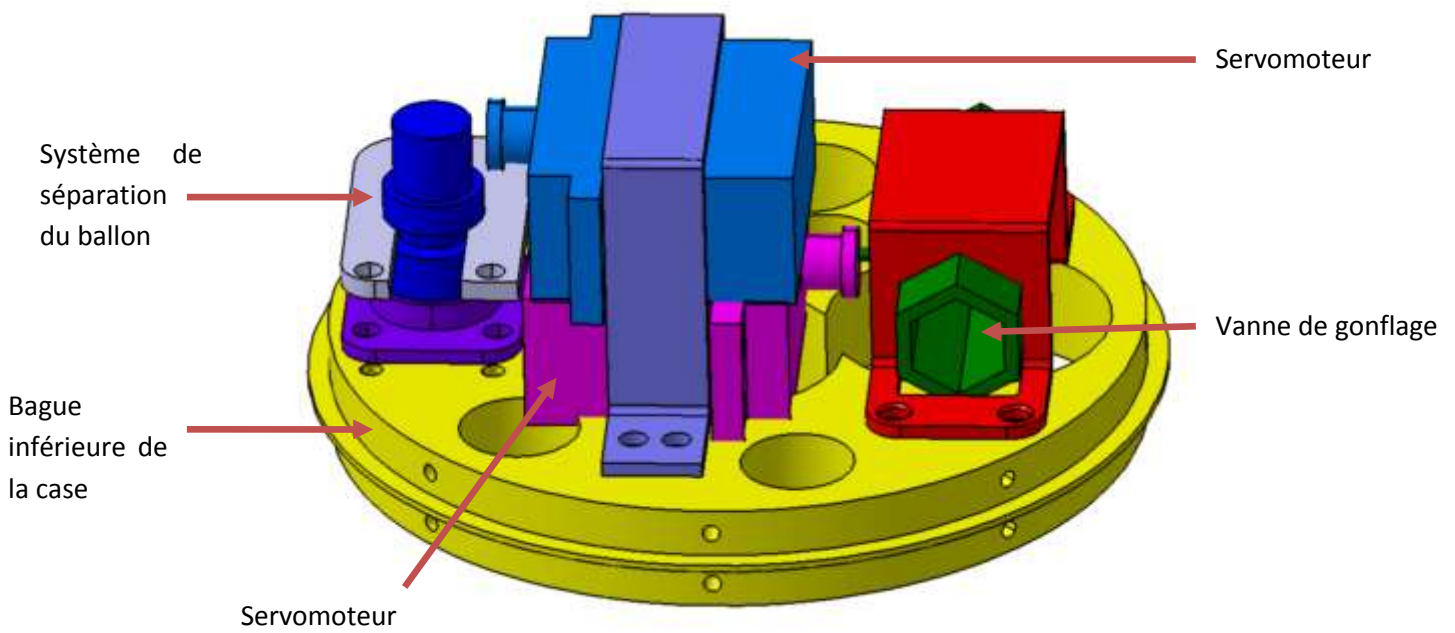


Figure 21 : assemblage système pneumatique

III. e. Case bouteille

III. e. 1. Fonction

Cette case a pour unique but de contenir la bouteille d'hélium (figure 22) et de la maintenir correctement en place dans la fusée (voir figure 23). La bouteille choisie est une bouteille appartenant au domaine du paintball. Elle est en Kevlar et résiste à une pression de 300bar. Sa contenance est de 1,15L et elle pèse moins d'1 kg. Nous avons réalisé des tests d'étanchéité sur de longues durées pour la sécurité du système, confirmant que la bouteille était capable de contenir de l'hélium, étant prévue initialement pour de l'air comprimé.



Figure 22 : Bouteille



Figure 23 : Assemblage case bouteille

III. e. 2. Réalisation

C'est la bouteille d'hélium qui a été le facteur décisif dans le choix du diamètre de la fusée. Ayant un diamètre extérieur de 110 mm, soit une distance de 2 mm entre la bouteille et la peau, le seul moyen de la maintenir en position est de la fixer en haut et en bas à l'aide des bagues. Nous avons pour cela ajouté aux bagues de base présentées en partie II. a un fond épousant la forme de la bouteille (figures 24 et 25). La hauteur du tube de peau a ensuite été ajustée petit à petit pour obtenir un maintien satisfaisant, sans pour autant imposer de sur-contrainte sur les trous contenant les vis fixant les bagues à la peau.



Figure 24 : Bague inférieure case bouteille

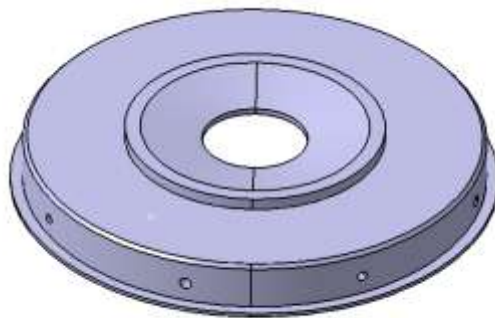


Figure 25 : Bague supérieure case bouteille

III. f. Case parachute

III. f. 1. Cahier des charges et fonction

Comme son nom l'indique, la case parachute contient le parachute de la partie supérieure de la fusée. Son bon fonctionnement est absolument nécessaire et sa réalisation doit respecter scrupuleusement un grand nombre de points du cahier des charges (voir annexe 5, section système de récupération). En particulier, du point de vue mécanique :

- L'éjection du parachute doit être franche.
- L'accélération et les vibrations de la fusée ne doivent pas modifier le fonctionnement du système de récupération.
- La descente de la fusée doit être suffisamment lente pour pouvoir la récupérer en bon état à l'atterrissage, et suffisamment rapide pour éviter qu'elle ne dérive hors de la zone de récupération : ainsi la vitesse de descente doit être comprise entre 5 et 15 m/s.

D'autres points comme le bon moment de l'ouverture pendant la chronologie du vol sont pris en charge par la partie électronique.

III. f. 2. Réalisation du réceptacle du parachute

Dans cette partie, l'utilisation d'une peau porteuse a été très intéressante. En effet, le parachute doit être contenu dans un réceptacle contenant le moins d'angles vifs possible afin de ne

pas risquer qu'il se déchire. Ainsi, un réceptacle circulaire est la meilleure solution de réalisation, et la peau porteuse cylindrique nous en fournit un presque complet. Il nous suffit de le fermer en haut et en bas, à l'aide de plaques de plexiglas (voir figure 26).



Figure 26 : Assemblage case parachute

III. f. 3. Système d'ouverture

La porte du parachute est découpée directement dans la peau. Afin de garantir le moins de jeu entre la porte et le reste de la case, elle est découpée à partir d'un autre tube et ajustée à la bonne dimension. Ainsi, il ne risque pas d'y avoir de prises d'air qui pourraient ouvrir la porte de façon prématurée.

Le système d'ouverture de la porte repose sur des encoches (fixées sur l'intérieur de la porte) et sur l'utilisation d'un servomoteur, qui entraîne en rotation une plaque de PVC (figures 27 et 28). Lorsque la porte est fermée, la plaque de PVC est à l'horizontale dans les encoches, ce qui maintient la porte. Lorsqu'on actionne le servomoteur, la plaque pivote de 90° et se libère des encoches. Le ressort fixé sur la plaque facilite alors l'éjection de la porte vers l'extérieur. Ce système ayant fait l'objet d'une étude approfondie lors des projets précédents et présentant très peu de défauts, nous l'avons repris en intégralité.

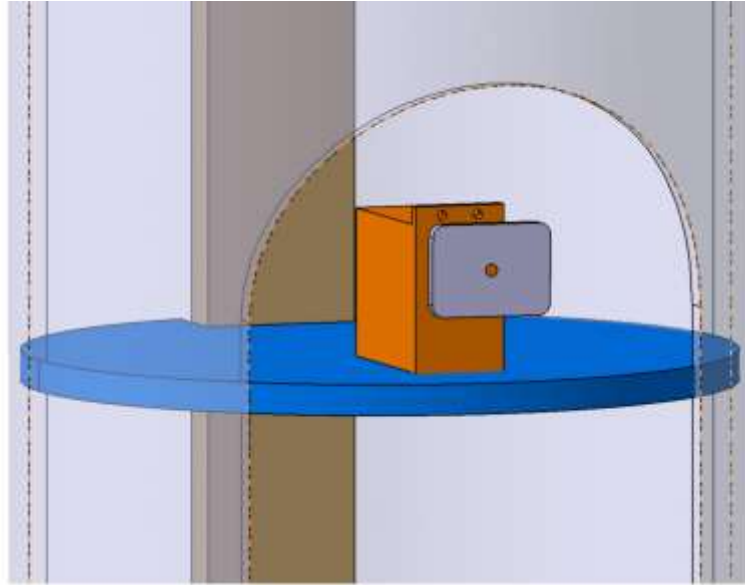


Figure 27 : Système d'ouverture



Figure 28 : Ouverture de la porte

III. f. 4. Dimensionnement et fixation du parachute

Le dimensionnement du parachute de la partie supérieure se fait sur le même calcul que celui de la case moteur et est donné en annexe 9. On obtient qu'il nous faut un parachute de $3,69 \text{ m}^2$ soutenu par au moins 12 suspentes.

De la même façon que pour le parachute de la case moteur, celui-ci sera fixé sur la bague inférieure de la case par l'intermédiaire d'un anneau vissé dedans. Cette bague a donc été adaptée à partir des bagues de base, en y ajoutant un fond suffisamment épais pour retenir le parachute à son ouverture (figure 29).

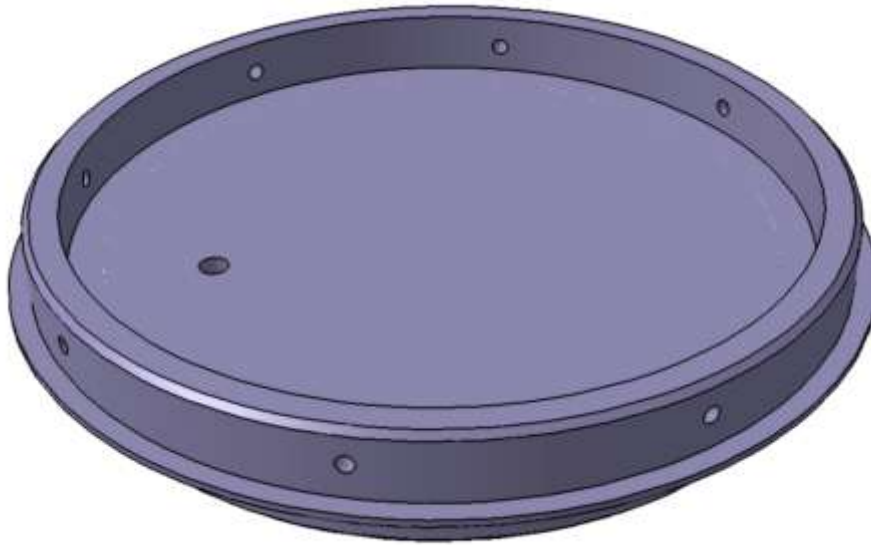


Figure 29 : Bague inférieure case parachute

III. g. Case électronique

III. g. 1. Cahier des charges et fonction

Cette case est celle qui va accueillir toutes les cartes électroniques qui garantissent le bon fonctionnement de la fusée au cours de son vol, ainsi que toutes les alimentations des composants électriques de la fusée. Au niveau mécanique, le cahier des charges de Planète Sciences précise que celle-ci doit se trouver le plus loin possible de la case moteur pour éviter les vibrations qui seraient dangereuses pour les cartes. Toutefois, il n'y a aucune condition sur l'intégration effective des cartes dans la fusée, qui est donc laissée à notre appréciation.

III. g. 2. Choix d'intégration

Comme il a été dit dans la partie II.c, nous avons cette année choisi de monter une partie des cartes électroniques sur charnières, ainsi que d'ouvrir la peau afin de pouvoir accéder aux cartes et aux batteries sans trop de difficultés.

Le système électronique est regroupé sur deux cartes, qui seront placées verticalement dans la case (voir figure 30). L'une sera fixée directement sur la peau, dans le fond de la case, et supportera en particulier les interrupteurs du système. L'autre carte sera mobile, tenue dans un cadre de cornières, cornières qui seront montées sur charnières directement sur la peau. La peau sera elle coupée en deux demi-cylindres, liés eux aussi par des charnières afin de permettre l'ouverture de la case une fois la fusée montée, et l'accès aux deux cartes électroniques.

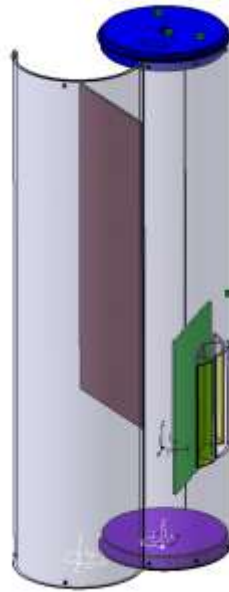


Figure 30 : Assemblage case électronique

Les batteries seront, elles, fixées sur la bague inférieure de la case. Nous avons donc modifié la bague de base, en fermant le fond.

III. g. 3. Réalisation technique

- Gorge pour les interrupteurs

Afin de protéger du mieux possible les interrupteurs et éviter qu'ils soient actionnés par la rampe lors du décollage de la fusée, nous avons décidé de pratiquer une ouverture dans la peau. Une gorge en plastique a été usinée de façon à ce que les interrupteurs ne dépassent pas du diamètre de la fusée (voir figure 31).

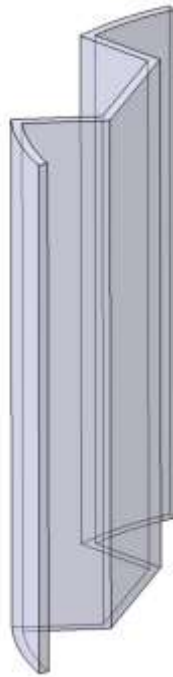


Figure 31 : Gorge plastique pour les interrupteurs

La gorge a été thermoformée et sera fixée à la peau avec un système vis-écrous.

- Choix des charnières

Le diamètre de la fusée devant rester le plus constant possible sur sa longueur, nous avons cherché les charnières les plus plates possibles vu les modèles disponibles pour le grand public. Vu notre utilisation, nous avons porté notre choix sur des charnières de piano (figure xx), suffisamment minces pour ne pas trop perturber l'aérodynamisme de la fusée. Elles ont de plus l'avantage d'être longue, ce qui nous permet de les placer tout le long de la case, à la fois pour l'ouverture de la peau et pour la carte électronique mobile.

- Ouverture/Fermeture de la case.

Afin de garantir la fermeture solide de la case, la partie mobile de la peau sera vissée aux bagues supérieure et inférieure. De plus, un joint de caoutchouc fera la liaison entre les deux parties libres de la peau pour éviter des ouvertures malvenues et combler les jeux créés par le découpage de la peau.

III. h. Coiffe

III. h. 1. Fonctions

La coiffe, située toute en haut de la fusée, a pour fonction principale d'assurer l'aérodynamisme de la fusée. Elle a de plus la tâche de maintenir en place l'antenne de télémétrie.

III. h. 2. Choix de forme et de matière

Afin d'assurer le meilleur aérodynamisme possible, la coiffe doit être pointue en son sommet pour fendre l'air, et suivre la forme de la fusée là où elle rejoint la peau, ce qui implique une tangente verticale à sa base. Nous avons donc choisie une forme ogivale.

Lors des projets des années passées, la coiffe a été réalisée en mousse de polyuréthane expansée. Cette méthode ayant fait ses preuves en termes de facilité de réalisation, de coût et de masse, nous avons décidé de la conserver, plutôt que de vouloir réaliser une coiffe creuse en polycarbonate. En effet, la réalisation technique d'une forme de ce type demande du matériel important que nous n'avons pas à notre disposition.

Les plaques de mousses sont collées les unes aux autres pour obtenir un bloc de dimensions convenables. Ce bloc est ensuite usiné à la machine à commande numérique pour obtenir la forme désirée.

III. h. 3. Bague de coiffe et assemblage avec la coiffe

Afin d'améliorer le maintien de la coiffe sur sa bague, nous avons choisi un centrage circulaire. La coiffe est donc en partie creusée à sa base, formant un creux dans lequel viendra s'enficher la bague (voir figure 32). Ainsi, l'alignement de l'axe de la coiffe avec celui de la fusée est garanti.



Figure 32 : Bague de coiffe (dessus)

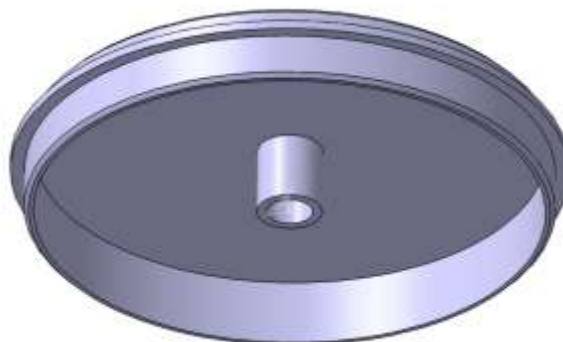


Figure 33 : Bague de coiffe (dessous)

Les contraintes latérales subies par la coiffe sont faibles, et très négligeables devant les contraintes normales. La fixation de la coiffe n'a donc pas besoin d'être très forte : on peut se contenter de scotch sur l'extérieur de la liaison (ce qui avait été fait sur la fusée du projet de la promotion 2011). Une autre solution, afin de simplifier le montage/démontage de la fusée, serait de placer des bandes velcro sur la surface entre la bague et la coiffe. C'est cette idée que nous avons retenue pour notre projet.

De plus, afin d'améliorer le maintien de l'antenne par la coiffe, nous avons choisi de pratiquer une ouverture dans la bague à la taille du tube correspondant (figure 33). Un joint en caoutchouc nous permettra d'accrocher l'antenne dans son emplacement.

IV. Conformité au cahier des charges de Planète Sciences

Nous avons pu, au cours de la conception, vérifier un certain nombre de points du cahier des charges de Planète Sciences à l'aide de la modélisation informatique des pièces effectuée sous Catia V5. Ces points ne seront validés définitivement que lors de la campagne de lancement, avec les tests effectués par les techniciens de Planètes Sciences. Toutefois, la plupart des tests étant suffisamment simple pour être réalisés par nous-mêmes, nous pourrions procéder à une nouvelle pré-validation lors du montage de la fusée.

IV. a. Gabarit de la fusée

- Finesse : elle est définie comme étant le rapport entre la longueur totale sans antenne, et le plus grand diamètre de la fusée. On a pour la fusée Zeppelin : $f = 18$, qui est donc bien comprise entre 10 et 35.
- Portance : elle est fournie par le logiciel *Stabilito* et vaut dans notre cas 15,7. Elle est donc bien dans l'intervalle[15; 40].
- Marge statique : de même, elle est fournie par *Stabilito* et vaut 5,8, et est donc bien comprise entre 2 et 6.
- Produit Portance/Marge statique : est doit être comprise entre 40 et 100 et vaut dans notre cas 79,7.

IV. b. Résistance mécanique

- Flèche : La flèche est définie comme étant le rapport entre la longueur totale sans antenne de la fusée et l'inclinaison à son sommet par rapport à son axe (voir figure 34). Les calculs de flèches ont été faits par éléments finis avec le module « Structural Analys » de Catia V5. Planète Sciences autorise une flèche à vide de 1%, et 1% supplémentaire lorsqu'une charge de 10 N est appliquée à son sommet. La flèche à vide vaut 0,2%, et 0,5% avec une masse de 10 N. Nous sommes donc bien dans les valeurs autorisées.

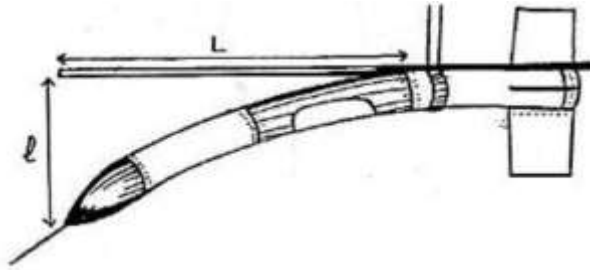


Figure 34 : Définition de la flèche

- Résistance en compression : Chaque élément de la fusée doit pouvoir supporter une compression équivalente à $F = 2A_M M_{sup}$ où A_M est l'accélération maximale de la fusée (fournie par le logiciel *Trajecto*) et M_{sup} est la masse de la partie supérieure à l'élément en question. De même que pour la flèche, les calculs ont été fait par éléments finis sous Catia. Nous avons réalisé les calculs pour chacune des cases de la fusée.
- Résistance mécanique des ailerons : De même, les ailerons ont été testés selon tous les cas de figure demandés par Planète Sciences. Ils vérifient les différents points. On peut trouver une description de ces points dans l'annexe 8.

IV. c. Système de récupération

- Dimensionnement des parachutes : Comme dit précédemment, voir annexe 9.
- Résistance mécanique spécifique à la case parachute : La porte ne doit pas s'ouvrir ou se bloquer lorsqu'on applique un couple de 1 Newton-mètre entre le haut et le bas de la fusée. Les simulations sous Catia V5 sont concluantes sur ce point.

IV. d. Autres points du cahier des charges

Les autres points du cahier des charges (partie mécanique) ne peuvent soit pas être validés avant que la fusée ne soit montée, soit ne concernent que des problèmes de compatibilités avec le matériel fourni par Planètes Sciences. Ils peuvent être retrouvés en intégralité dans l'annexe 5 du présent rapport.

V. Etat d'avancement de la partie mécanique

V. a. Structures réalisées à ce jour

Tronçons de peau : découpés en tronçons cylindriques avec des outils spécifiques à l'usinage du polycarbonate.

- Coiffe : assemblage par collage des couches de matières (polyuréthane et polystyrène) en deux blocs en vue de l'usinage de deux coiffes.
- Case électronique : - Gorge en plastique thermoformé.

- Bagues usinées à l'aide d'un tour conventionnel.

- Case parachute : bagues usinées à l'aide d'un tour conventionnel.
- Case bouteille : bagues usinées à l'aide d'un tour conventionnel.

- Case pneumatique : pièces de maintien des servomoteurs réalisées par thermoformage.
- Case de séparation : - Bagues usinées à la commande numérique.

- Calles en U de support des goupilles usinées à la fraiseuse conventionnelle.

- Case moteur : bague de poussée usinée à l'aide d'un tour conventionnel.

V. b. ce qu'il reste à faire :

- Coiffe : usinage à la commande numérique de la coiffe en forme de cône.
- Case électronique : - installation des charnière et cornière sur la peau.
- usinage des orifices d'ouvertures de la case et de la gorge des interrupteurs.

- Case pneumatique : - perçage de trous pour le système de détachement.

- perçage des trous de fixations des pièces de maintien et des pièces du système de détachement.

- pièces du système de détachement et calle de la vanne en aluminium usinés avec une fraise conventionnelle.

- Case de séparation : - Tiges de séparation usinées au tour conventionnel.

- Goupilles de séparations usinées au tour conventionnel.

- Case moteur : Bague de retenue et bague de centrage usinées à l'aide d'un tour conventionnel.
- Peau : usinage des orifices au niveau de la case électronique.
- Peau et bagues : perçage des trous dans les bagues et les tronçons de peau qui permettront la fixation entre les bagues et la peau.

Partie C : Electronique embarquée sur la fusée Zeppelin

Introduction :

Riche de l'expérience héritée de la réalisation de la fusée Hermès et de la campagne de lancement 2010, nous avons décidé de poursuivre la fiabilisation et l'optimisation de l'électronique. Le premier pas inscrit lors du projet 2009-2010 a été le passage au numérique de l'électronique. Cependant, la courte échéance n'avait alors pas permis de tirer la totalité du potentiel de ce nouveau choix technologique.

Cette année, le numérique sera donc toujours un point clé de notre structure de commande et de mesure. Nous avons décidé de nous concentrer parallèlement sur l'interactivité entre l'utilisateur et l'électronique embarquée dans la fusée, cet aspect n'ayant été que faiblement mis en valeur par notre précédent projet.

Quand nous parlons d'interactivité, il s'agit autant de l'interactivité lors de la maintenance que lors de la procédure de préparation au décollage. En effet, pour faciliter la maintenance, il est nécessaire de penser l'intégration des cartes électroniques et la mise en valeur de l'origine des pannes pour l'utilisateur. Dans le cadre de la procédure de préparation au décollage, le maître-mot reste la simplicité : réduire au maximum le nombre de commande à actionner et favoriser la clarté du panneau de contrôle !

I. Définition du cahier des charges

Notre participation à la campagne de lancement nécessite que l'électronique de notre fusée expérimental vérifie le cahier des charges fixé par Planète-Sciences (un contrôle est effectué pour nous autoriser au lancement). Le cahier des charges que nous avons établi est donc complémentaire de celui de Planète-Sciences.

I. a. Cahier des charges de Planète Sciences

Généralités

- La fusée doit comporter au moins une expérience.
- Les expériences devront faire l'objet d'un compte-rendu détaillé à remettre à Planète Sciences.
- Nous devons faire les schémas électriques de toute l'électronique.
- Le système doit avoir une autonomie globale d'au moins 45 minutes.

Télémesure

- Nous avons des impératifs pour ce qui est de la structure de la trame numérique de télémétrie, des fréquences de modulation etc., ces points seront détaillés dans la suite du rapport.
- Pour ce qui concerne l'émetteur (fourni par Planète Sciences), des règles sont indiquées pour l'alimentation, les réglages, l'autonomie etc.

Séquenceur

- La fusée doit comporter un séquenceur, c'est-à-dire un minuteur, qui doit contrôler l'ouverture du parachute.
 - Il doit être électriquement indépendant du reste de l'électronique, pour des raisons de sécurité.
 - Il doit être capable d'envoyer un signal actionnant les servomoteurs qui déclenchent l'ouverture du parachute.
 - Tout signal de détection d'apogée (par des capteurs) déclenchant l'ouverture du parachute doit d'abord passer par le séquenceur pour que l'ouverture n'ait pas lieu à n'importe quel moment
-
- Il y a aussi des règles de qualité : nous devons avoir tous les plans électriques, la documentation des composants utilisés, suivre le planning Planète Sciences pour ce qui est des validations intermédiaires qui ont lieu régulièrement.

I. b. Cahier des charges complémentaire

Durant la phase de conception de l'électronique embarquée, nous avons établi un cahier des charges complémentaire. Il comporte deux axes majeurs : le besoin Air/Sol qui traduit le fonctionnement de l'électronique et l'interactivité qui exprime la relation avec l'utilisateur.

I. b.1. Besoin air/sol

a. Air :

α. Sécurité

- La partie électrique de déclenchement du parachute (jack + séquenceur) doit être isolée électriquement (hors masse).
- L'actionneur lié au parachute doit pouvoir être verrouillé et contrôlé indépendamment.
- Le protocole de communication doit présenter une sécurité passive.

β. Expériences en vol

Expérience Ballon

- Un séquenceur pour le déclenchement de ou des actionneurs (3) pour la commande de l'expérience Ballon.
- Chaque actionneur doit pouvoir être verrouillé individuellement sans action sur l'alimentation des cartes de commande.
- Un capteur par actionneur doit permettre de contrôler son verrouillage.

Expérience Position

- Des capteurs doivent permettre de mesurer l'accélération de la fusée et son angle pendant son vol.
- Les données devront être transmises pour la détection d'apogée.

Expérience Image

- Une caméra doit pouvoir être commandé pendant le vol (temporisation de fin).

y. Communication

- Transmission des mesures et des **états de fonctionnement** par un transmetteur KIWI.
- Enregistrement des mesures sur une mémoire.
- Les trames transmises doivent contenir au moins une clé anti-erreur.

b. Sol :

α. Batterie

- Les batteries doivent pouvoir être directement chargée sans être extraite de la fusée grâce à un système interne ou externe.
- La charge des batteries doit pouvoir être contrôlé avec un système interne ou externe à la fusée.

β. Communication

- Accéder aux informations qui ont été écrites dans la mémoire.
- Accéder au port série des microcontrôleurs par le biais du port USB d'un ordinateur.

I. b. 2. Interactivité

a. Intégration de l'électronique :

α. A l'intérieur du module électronique

- Accessibilité de l'ensemble des cartes sans avoir à les désolidariser de leur support.

- Ouverture du module électronique sans action sur les cartes électroniques ni sur le panneau de contrôle.
- Intégration de la prise jack, des blocs batterie et de la caméra dans le module électronique.
- Résistance aux accélérations du décollage et l'arrivée.
- Découplage des fonctions en plusieurs cartes.
- Communication par fils groupés entre les cartes (signaux et alimentations).

β. Entre la case électronique et l'extérieur

Connectique

- Passage facile de câbles entre les différents modules de la fusée.
- Découplage aisé des connexions (module électronique externe + antenne KIWI).

Panneau de contrôle

- Accès facile aux interrupteurs de commande.
- Visibilité claire du panneau de contrôle (LED + Interrupteurs + Afficheur 7 segments + Afficheur LCD).
- Aucune interaction autre que volontaire entre l'extérieur et les panneaux de contrôle et de commande.

b. Contrôle :

- Chaque source d'alimentation doit avoir un témoin d'alimentation direct (qui ne passe donc pas par un microcontrôleur).
- Les temporisations (KIWI et séquenceurs) doivent être mises en valeur.
- La proximité temporelle d'une action mécanique doit être signalée de manière sonore et/ou visuelle avant son déclenchement.
- Chaque état de fonctionnement doit être clairement visible.
- Le verrouillage de chaque servomoteur doit être visible individuellement.
- Un témoin doit indiquer la fin de la procédure de préparation au décollage.

c. Commande :

- Chaque source d'alimentation doit pouvoir être allumée ou éteinte individuellement.
- Toute procédure doit pouvoir être avortée à tout moment.
- La commande de décollage doit UNIQUEMENT être déclenchée par la prise Jack.
- Une commande SOL/AIR doit être disponible pour choisir entre un vol réel ou une restitution des informations.
- Nettoyage de la mémoire par une commande non accessible ou furtive.
- La commande de verrouillage de chaque servomoteur doit être individuelle.

I. Conception de l'électronique

1. Aperçu général du système

a. Rappel des objectifs

Rappelons succinctement les expériences qui devront être effectuées :

- Mesure de l'**inclinaison** de la fusée pour détecter l'apogée.
- Prise d'une **vidéo** du vol de la fusée.
- Ejection d'un ballon.

Elle devra en plus assurer les fonctions suivantes :

- **Enregistrer** les données sur une **mémoire** pour les récupérer après le vol.
- Transmettre les données par **télétransmission** avec un émetteur haute fréquence.
- **Compter le temps** qui s'écoule à partir du décollage pour déclencher l'ouverture du parachute au bon moment, tout en prenant en compte un éventuel signal de détection d'apogée fourni par l'expérience associée.

b. Quelle architecture pour l'électronique ?

Les cartes électroniques :

Pour répondre au cahier des charges que nous avons établi précédemment, nous avons décidé de séparer l'électronique en deux cartes distinctes. Une carte est en charge de l'alimentation et de l'interaction avec l'utilisateur (interrupteurs, LEDs, afficheur 7 segments, afficheur LCD). L'autre contient la partie intelligente de notre électronique, c'est bien sûr sur celle-ci que nous trouverons les microcontrôleurs. Par la suite, nous appellerons la première la carte d'alimentation, et la deuxième la carte microcontrôleur.

Le bloc alimentation

Le bas de la case électronique est occupé par les batteries. La complexité de notre électronique embarquée nécessite trois batteries différentes pour effectuer l'ensemble des fonctions et surtout vérifier le cahier des charges (en termes d'autonomie et de sureté notamment). Les batteries sont toutes connectées à la carte d'alimentation. Leur chargement est effectué par le biais d'un connecteur pour chargeur mis en place sur la carte d'alimentation.

Les batteries qui ont été achetées ont une capacité de 2700mAh, elle assure une autonomie suffisante pour le fonctionnement de l'ensemble de nos systèmes pendant toute la phase de lancement.

Les batteries sont groupées à l'aide d'un coupleur 6 piles :



Figure 35 : Coupleur de piles

Le chargeur-déchargeur utilisé pour la gestion de la charge des batteries :



Figure 36 : Chargeur - déchargeur numérique

2. Constitution d'une carte électronique

Nous allons décrire les éléments principaux que nous allons trouver sur notre carte microcontrôleur.

Composants de base

La plupart des composants électroniques qui composent notre carte sont des composants passifs classiques : résistances, condensateurs, diodes électroluminescentes, etc.

Capteurs

Pour réaliser les expériences de mesure choisies, nous avons utilisé une platine accéléro-gyro-magnétométrique. Le fait d'utiliser un système déjà conçu permet d'accéder à une autre échelle d'électronique. En effet, le fait que ces modules électroniques soient réalisés industriellement permet un gain en masse, en volume et en temps non négligeable. Il s'agit en revanche d'un composant qui est couteux et qui doit donc être manipulé avec soin.



Figure 37 : Centrale inertielle

Microcontrôleur

Ils sont tous situés sur la carte microcontrôleur. Il s'agit d'un composant numérique disposant d'une mémoire où l'on peut stocker un programme codé en langage C. Ce microcontrôleur est capable de convertir des signaux électriques analogiques en signaux électriques numériques, de servir d'horloge, de communiquer avec d'autres microcontrôleurs, pour ne citer que quelques exemples. En d'autres termes, c'est le composant qui est l'intelligence de la fusée.

Nous utilisons des microcontrôleurs de chez Microchip, du modèle PIC18F252. Nous avons obtenu des échantillons gratuits.



Figure 38 : micrcontrôleur PIC 18F252

Liaison entre les cartes

Tous les signaux échangés avec le reste de l'électronique passent par un connecteur HE10 (norme) 20 contacts, soudé sur la carte, qui viendra s'enficher dans la carte verticale présentée par la suite.

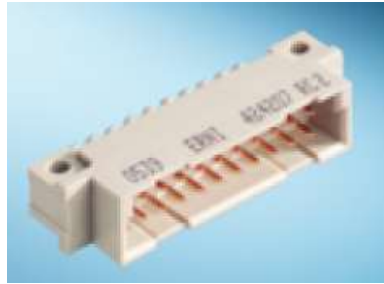


Figure 39 : Connecteur HE10 mâle coudé

Programmation

Pour être programmé, le microcontrôleur doit être relié à un ordinateur en passant par une interface de programmation, qui se connecte d'une part à l'ordinateur par le biais d'un interface et d'autre part à la carte avec un câble de type RJ12 (prise téléphone). On utilise donc un petit composant où vient s'enficher le câble RJ12, et dont plusieurs pattes sont reliées aux pattes de programmation du microcontrôleur.



Figure 40 : Embase modulaire RJ12

Relais

Il est nécessaire de gérer les alimentations de certains modules électroniques. En effet, pour répondre au cahier des charges, l'émetteur KIWI doit s'arrêter automatiquement au bout de 45 minutes (dans l'hypothèse où la fusée n'est pas retrouvée). Il en est de même pour la caméra qui est arrêtée après le vol.



Figure 41 : Relais

Pour effectuer ces tâches, on utilise des relais qui sont commandés par le microcontrôleur état puisque ce microcontrôleur est le seul à connaître dans quelle état est et doit être la fusée à chaque instant.

Découplage

Pour améliorer la qualité des signaux circulant sur la carte, et pour éviter qu'une demande de puissance soudaine, par exemple par un microcontrôleur, ne puisse être satisfaite, nous utilisons des condensateurs dits « de découplage » dont le rôle est en quelque sorte de stocker de la puissance. Ils vont par paire : un condensateur de 100nF et un condensateur polarisé de 100 μ F. Nous en mettons à côté de chaque composant qui est susceptible de demander une puissance significative (capteur, AOP, microcontrôleurs...).



Figure 42 : condensateurs de découplage

Datasheet

La *datasheet* est un élément clé de notre travail. Pour chaque composant, un fichier pdf est disponible sur Internet avec toutes les informations nécessaires pour l'utiliser correctement (caractéristiques électriques, mécaniques, dimensions, etc.). On appelle cela une *datasheet*. Nous en avons mis quelques-unes en annexe.

3. Organisation spatiale de la case électronique

Nous ne détaillerons pas à nouveau ici ce qui a déjà été fait dans la partie sur la structure de la fusée.

Pour favoriser l'interactivité avec l'utilisateur, il a été choisi d'avoir une peau transparente pour garder un visuel sur l'électronique pour l'utilisateur. De plus, il a été mis au point un système permettant un accès rapide aux deux cartes de la fusée tout en maintenant leur fonctionnement.

Quant à l'interface avec l'utilisateur (interrupteurs, LEDs, afficheur 7 segments et afficheur LCD), il a été décidé de les placer dans une gorge pour les protéger pendant le vol.

On a donc décidé de l'organisation suivante :

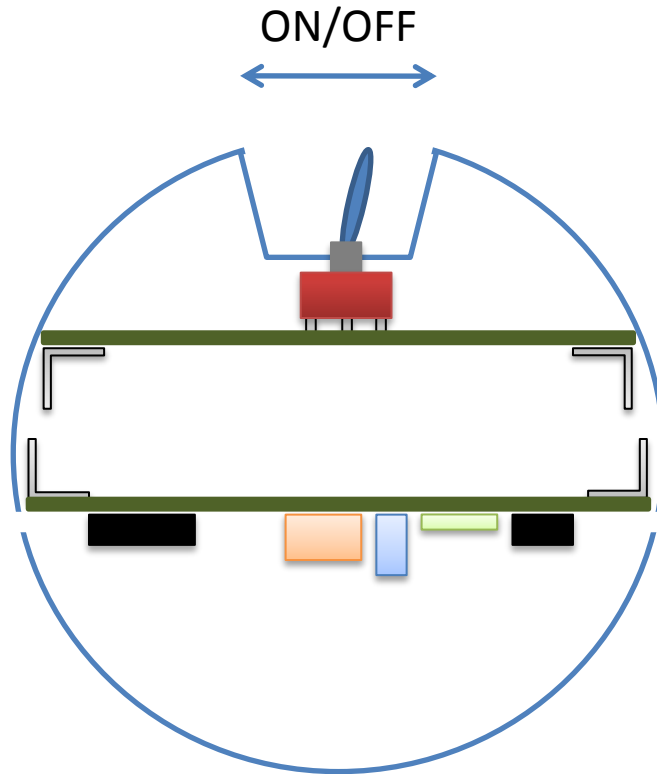


Figure 43 : Case électronique fermée

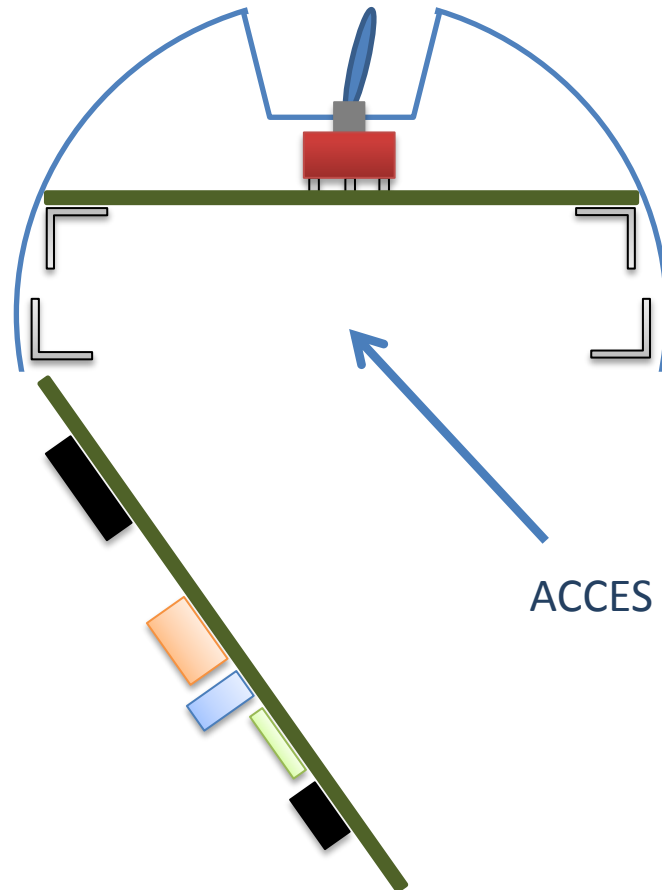


Figure 44 : Case électronique ouverte

4. Architecture de la carte microcontrôleur

Pour répondre au mieux au cahier des charges que nous nous sommes fixés, nous avons décidé de réaliser une structure autour de quatre microcontrôleurs.

Un microcontrôleur va s'occuper de gérer les états du système, il sait à tout instant dans quelle état est la fusée. Nous avons distingué 9 états différents de la fusée :

- Non initialisée
- Actionneur Para OK
- Actionneurs Ballon OK
- En attente décollage
- Vol passif ascendant
- Vol actif Ballon OK
- Vol actif Para OK
- Vol passif descendant
- Fin de la temporisation KIWI

Ce microcontrôleur sera en position de maître sur les autres microcontrôleurs, il gèrera l'alimentation des modules externes dont les temporisations. Il sera aussi en charge de l'interaction avec l'utilisateur par le biais de l'afficheur LCD (cf Annexe sur la commande de l'afficheur LCD).

Pour des raisons de simplification de structure et de programmation, ce sera aussi ce microcontrôleur qui écrira et lira la mémoire.

Un deuxième microcontrôleur récupèrera les informations des capteurs et gèrera la télémessure. Il préparera aussi les informations a envoyé sur la mémoire. Il sera également à l'origine du signal d'apogée qui déclenchera les séquenceurs plus ou moins tôt.

Un troisième microcontrôleur sera en charge de la sécurité du vol, il assurera le décompte et le fonctionnement du servomoteur qui ouvre la case parachute. Il communique avec le premier microcontrôleur pour recevoir le signal d'apogée par le biais d'optocoupleurs qui permettent d'isoler électriquement ce circuit. Il peut envoyer aussi un signal microcontrôleur de gestion des états pour informer de l'ouverture du parachute.

Le quatrième et dernier microcontrôleur assurera lui le lancement du ballon, il sera constitué également d'un compteur qui déclenchera le fonctionnement de servomoteurs à l'apogée. Par contre, il communiquera par le biais de la liaison SPI que nous allons détailler en dessous.

Pour le fonctionnement des microcontrôleurs PIC que nous utilisons sur nos cartes, il est nécessaire qu'ils aient un environnement adapté qui assure les besoins en énergie du composant et sa programmation. A cela viennent s'ajouter les entrées-sorties qui permettent l'interaction avec le reste de l'électronique. Ci-dessous se trouve l'environnement type de nos microcontrôleurs :

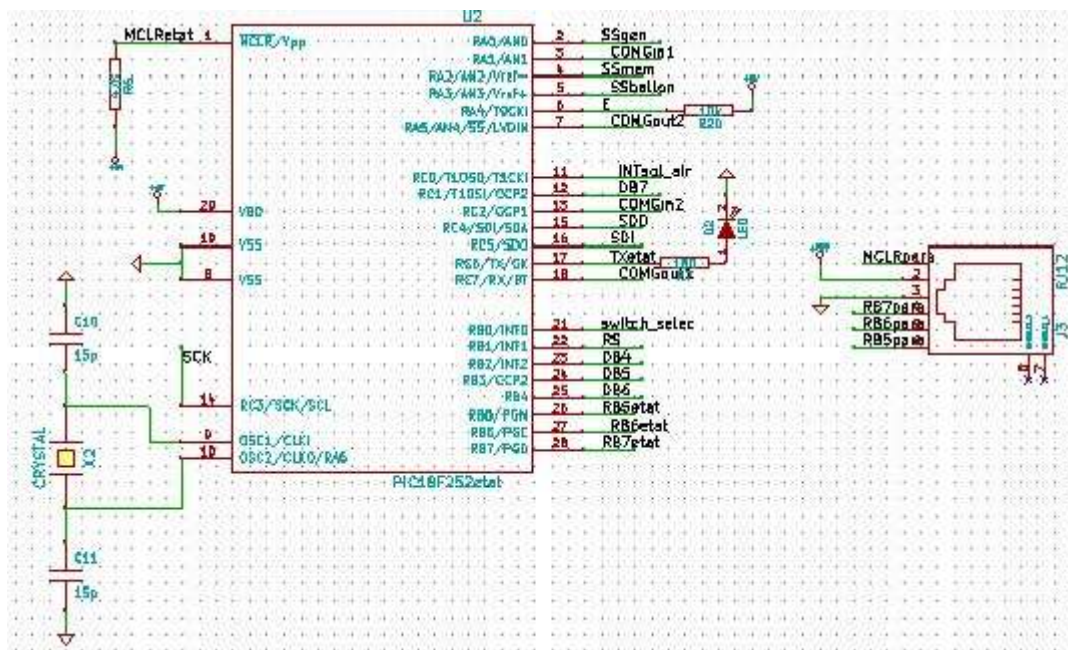


Figure 45 : Schématique environnement PIC

On reconnaît notamment son alimentation +5V sur Vdd, la masse sur les pins Vss, l'horloge du microcontrôleur formée d'un quartz entouré de deux condensateurs céramiques. Les pins de programmation RB5, RB6 et RB7 et la pin MCLR qui permet la reprogrammation du composant.

Avec ces quelques composants, on obtient un microcontrôleur PIC est fonctionnel et programmable. En revanche, il faut assurer son interaction avec les autres composants de l'architecture électronique. Ce sera le sujet des parties qui suivront.

a. Liaison SPI

Pour avoir une architecture fonctionnelle, ces microcontrôleurs ont besoin de communiquer entre eux. Nous avons choisi d'utiliser la liaison SPI qui est disponible sur les microcontrôleurs PIC que nous utilisons.

Nous avons pris une structure en étoile maître/esclaves autour du microcontrôleur Etat qui est alors le maître. Il communique en liaison série SPI (Serial Peripheral Interface) avec les autres microcontrôleurs, esclaves, quand ceux-ci sont sollicités par le premier. Le schéma ci-dessous illustre le fait qu'on a besoin d'une voie dite SDI où rendre les données, une voie SDO d'où sortent les données, une voie SCK qui correspond à l'horloge (pour la synchronisation entre émetteur et récepteur) et enfin une voie de sélection.

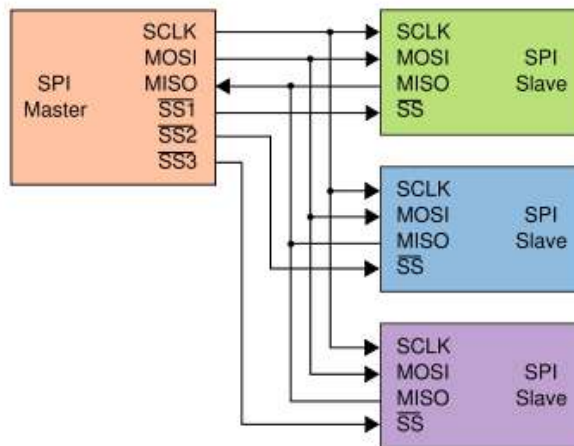
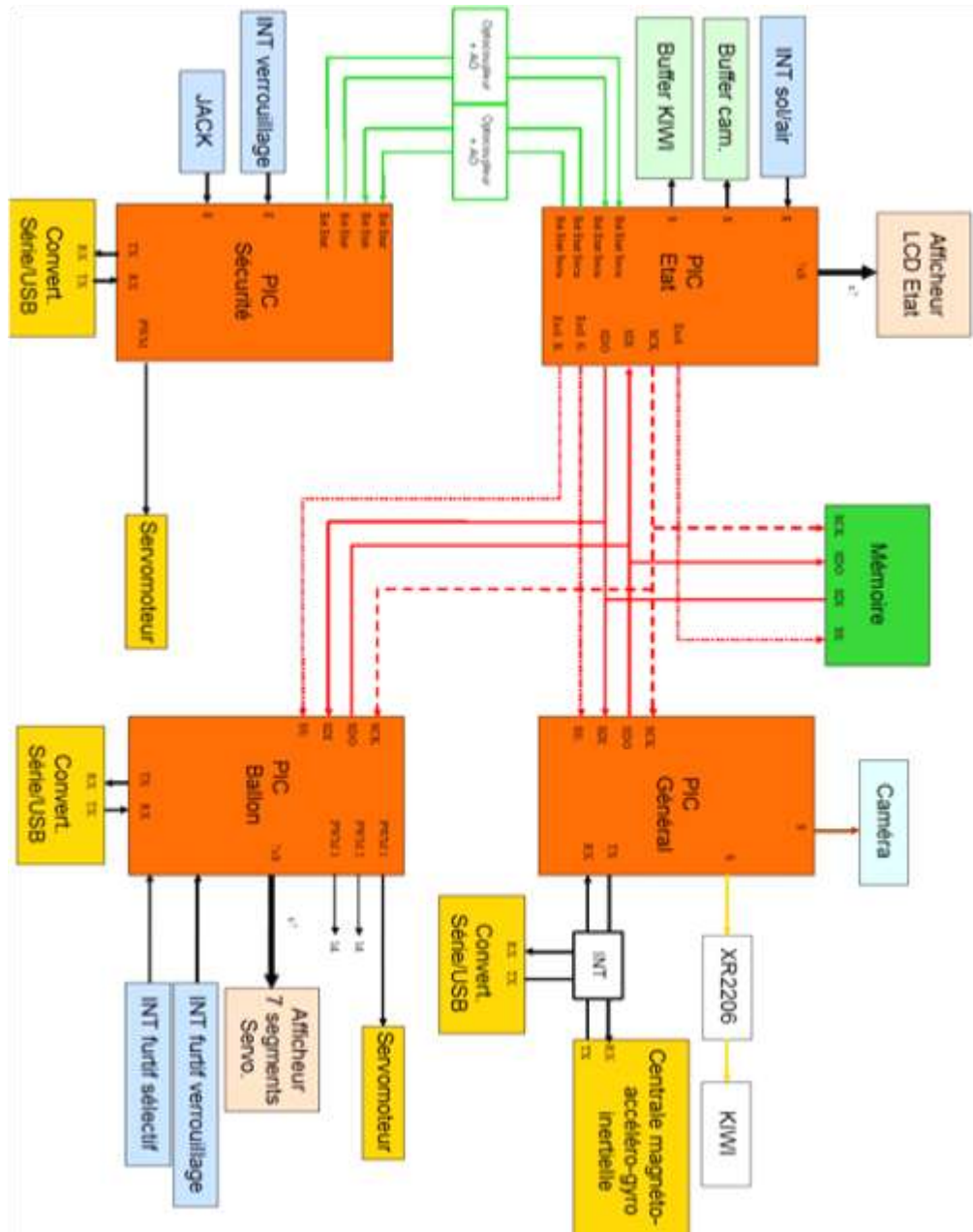


Figure 46 : Communication SPI

Nous avons ainsi décidé de l'architecture suivante :



b. Capteurs

Mesure accélero-magnéto-gyrométrique



Figure 47 : Centrale inertielle

L'ensemble des capteurs qui sont emportés dans la fusée pour la détection de l'apogée sont regroupés sur un module produit par Sparkfun. Il regroupe trois accéléromètres, trois gyromètres et trois magnétomètres. Le conditionnement des signaux ici des capteurs et leur traitement est assuré par un microcontrôleur (Arduino) sur la platine.

Nous avons programmé ce microcontrôleur à partir d'un code fourni par le fabricant. Sa prise en main est donc aisée moyennant une bonne connaissance du fonctionnement des microcontrôleurs. Un autre avantage de ce type de platine est le gain en volume, masse et en temps de réalisation par rapport à un tel module réalisé traditionnellement.

Les mesures peuvent être récupérées sur nos microcontrôleurs grâce à une liaison série. Nous en retirerons principalement des informations sur l'inclinaison de la fusée par rapport au sol. Cette valeur nous permettra de détecter l'apogée de la fusée et donc de déclencher éventuellement plus précisément l'ouverture du ballon et du parachute. Les mesures seront parallèlement mémorisées dans la mémoire et transmises au sol par le biais de l'émetteur KIWI.

La caméra

La caméra que nous allons utiliser est une petite caméra **d'aéromodélisme**, totalement autonome mise à part l'alimentation, qui prend des vidéos et des photos et les stocke sur une carte SD.

C'est la caméra FlyCamOne 2 éco de chez Air-Ace.

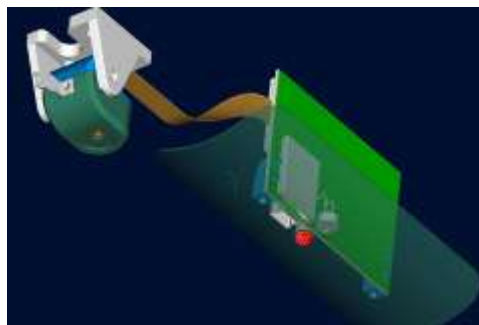


Figure 48 : Caméra FlyCamOne 2 éco

c. Contrôle

Pour vérifier que les servomoteurs ont bien effectué les mouvements que nous leurs avons demandés, nous avons installé des interrupteurs à lame souple (ILS).

Son principe de fonctionnement est le suivant : deux lames souples se trouvent dans une ampoule protectrice en verre. Au repos, elles ne sont pas en contact, et l'interrupteur est donc ouvert, lorsqu'un aimant passe à proximité, les lames entrent en contact et l'interrupteur est fermé.

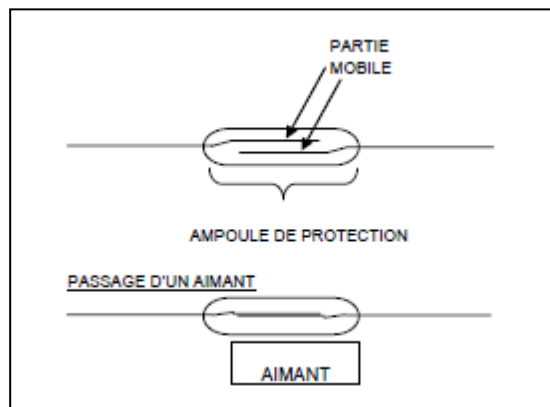


Figure 49 : ILS

Ainsi, en plaçant avec soin les couples ILS/aimant autour des servomoteurs, nous pourrons contrôler le correct verrouillage de chaque élément, et notamment du parachute qui est l'élément clé de notre fusée.

d. Communication

La chaîne de télémétrie

La notion de chaîne de télémétrie est un élément clé pour bien comprendre l'électronique de la fusée. C'est le parcours effectué par le signal du capteur à la réception au sol. En effet il ne faut pas oublier que c'est un fil conducteur du projet que de réaliser des expériences et d'envoyer les résultats au sol pendant le vol de la fusée.

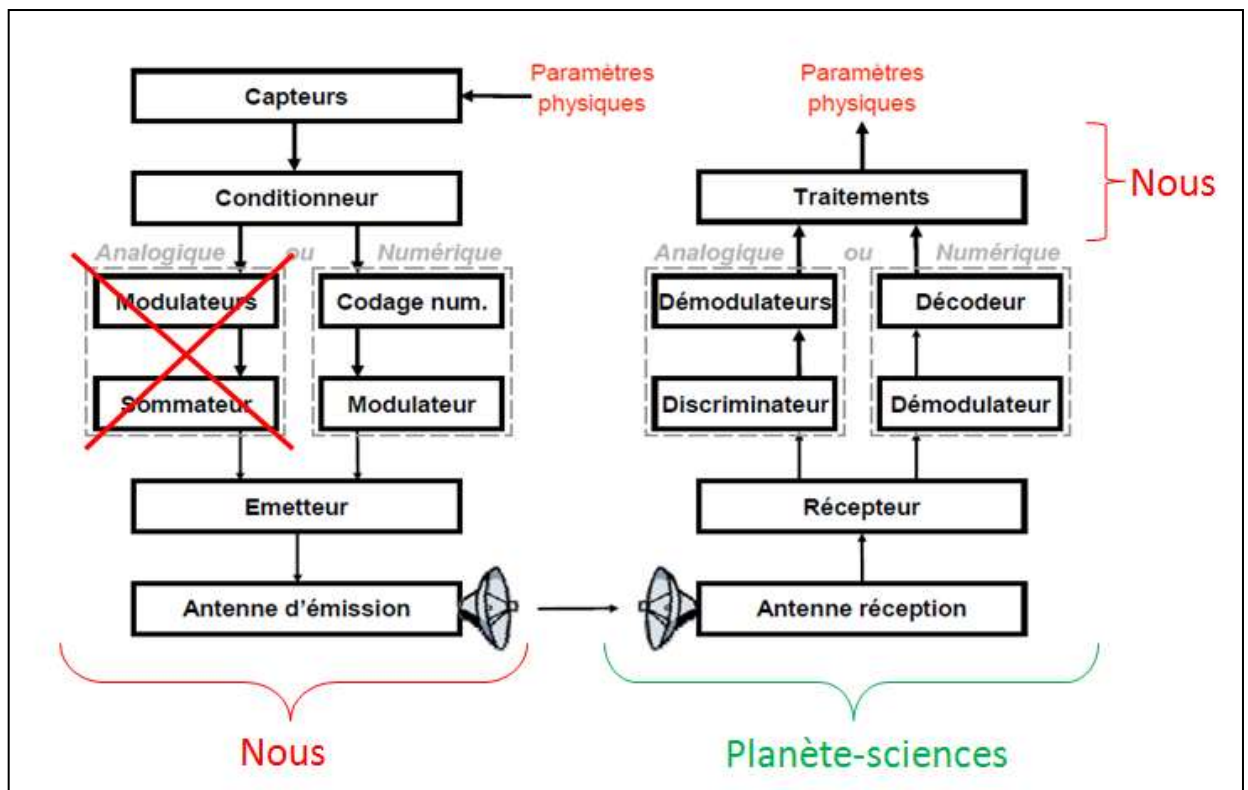


Figure 50 : Chaîne de télémesure

Nous nous chargeons de tout jusqu'à l'émission (incluse), et c'est Planète-Sciences qui s'occupera de la **réception**, dans son camion de télémesure lors de la campagne. Nous devons aussi effectuer les traitements des données reçues.

Nous allons maintenant décrire précisément chaque étape (dans l'ordre) de cette chaîne de télémesure.

Capteur

Le capteur mesure un paramètre physique. En sortie il donne une tension proportionnelle à la valeur de la grandeur physique mesurée.

Conditionnement

Ce signal doit être ensuite conditionné par plusieurs blocs électroniques pour le rendre plus propre et plus apte à circuler dans le reste de la chaîne de télémesure.

Le signal de sortie du capteur doit être obligatoirement conditionné pour répondre à plusieurs objectifs :

- il faut que sa plage corresponde à la plage d'entrée du convertisseur analogique/numérique (c'est-à-dire du microcontrôleur), pour que la conversion se fasse avec la plus grande précision possible

- il faut éviter la propagation du bruit le long de la chaîne de télémesure

Nous ne détaillerons pas plus le conditionnement qui est effectué directement sur le module du capteur (nous ne le réalisons pas nous-même), les données étant envoyées en numérique via le port série sur le microcontrôleur.

Conversion analogique/numérique

Le signal analogique est ensuite converti en un signal numérique sur 8 bits à la fréquence d'échantillonnage que nous aurons choisie. C'est une partie du travail de programmation que nous avons réalisé.

Codage numérique

Le signal, qui est **analogique**, est ensuite converti en signal **numérique** (sur 8 bits), ce qui permet qu'il soit moins sensible au bruit, et aussi de faciliter les opérations (addition, multiplication, etc.) si on veut en effectuer dessus.

Le signal numérique est ensuite organisé en **trames** (c'est-à-dire en série) en prévision de l'émission vers le sol, car on ne peut envoyer qu'une succession de bit dans le temps et pas plusieurs octets à la fois. Pour ce codage en trame on utilise le **standard SNR** Planète-Sciences. Il consiste à associer à chaque octet que l'on veut mettre dans la trame un bit de **start** et un bit de **stop**, et ensuite à ranger ces « octets » de 10 bits les uns après les autres dans la trame, en faisant débiter chaque trame par un octet dit de **synchronisation** prenant la valeur hexadécimale FF.

Remarque : Bit de start, de stop et octet de synchronisation sont là pour que le logiciel de télémesure ne perde pas la synchronisation si jamais il y avait un problème sur une trame. Seule celle-là serait perdue et la réception continuerait.

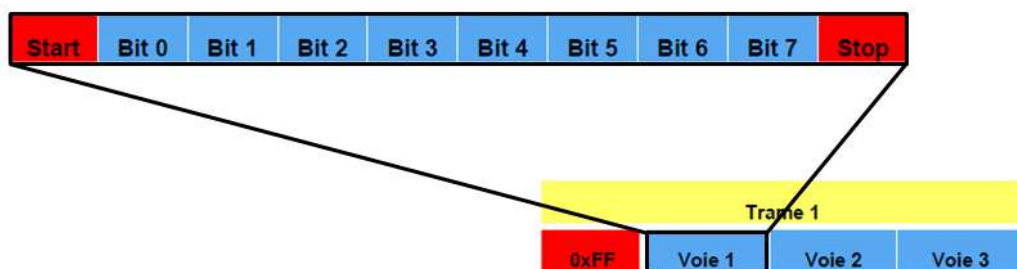


Figure 51 : Structure d'une trame

Dans une trame, on peut mettre autant d'octets qu'on veut, soit plusieurs octets correspondant à plusieurs mesures d'un même capteur, soit un octet (= une mesure) pour chaque capteur. Cela dépend de la fréquence avec laquelle on veut envoyer les mesures. La structure des trames peut aussi changer au cours du vol. Par exemple une fois que le parachute s'est déployé nous

ne pouvons plus mesurer la vitesse avec le système utilisé pendant la phase de montée, il n'est alors plus utile d'envoyer ses mesures.

On envoie ensuite une succession de trames vers **le modulateur**.

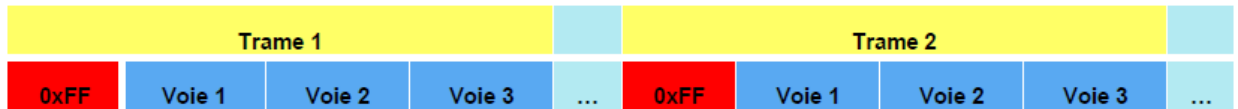


Figure 52 : Succession de trames

Modulateur

La modulation utilisée est une modulation de type **FSK** : frequency shift keying. Le principe est d'attribuer une fréquence donnée à un bit valant 1 (tension de 5V) et une autre fréquence à un bit valant 0 (tension de 0V). Pour ce faire on utilise un modulateur de type **VCO** : voltage output controller. Ce composant crée un signal **alternatif** en sortie, dont la fréquence dépend de la tension d'entrée. Le composant utilisé sera présenté plus tard, dans sa carte électronique.

En mettant en entrée un signal numérique, on obtient donc un signal analogique.

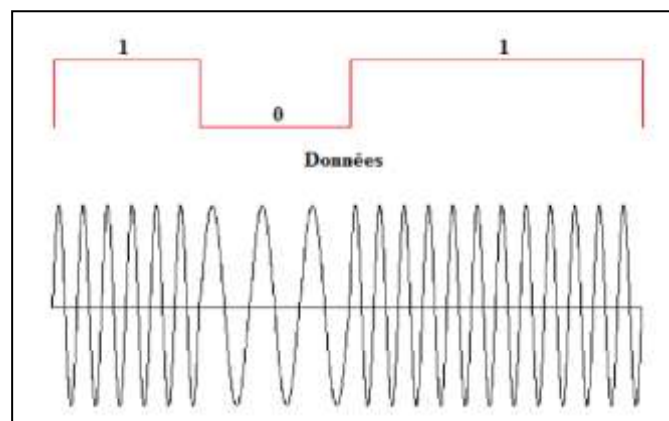


Figure 53 : Modulation FSK

e

so

Le choix des **deux clés de fréquences** associées à l'état haut et l'état bas dépend du débit de données que l'on veut avoir. Elles sont récapitulées dans le tableau suivant, donné par Planète-Sciences.

Débit	Clé de fréquence f0	Clé de fréquence f1
600 Bauds	900 Hz	1500 Hz
1200 Bauds	1200 Hz	2200 Hz
4800 Bauds	9000 Hz	15000 Hz
9600 Bauds	14400 Hz	24000 Hz
14400 Bauds	21600 Hz	36000 Hz

Tableau 1 : Correspondance débit/clés de fréquences

Nous avons choisi un débit de **4800 bauds** (1 baud = 1 bit/s), car Planète-Sciences décode facilement un signal modulé ainsi, ce qui n'est pas toujours le cas avec des débits plus hauts.

On a avec un débit de 4800 bauds, dans une trame composée de 5+1 octets (5 voies pour 5 capteurs sans compter le GPS qui ne demande pas beaucoup de débit, et 1 octet de synchronisation) composés de 10 bits chacun, un débit par voie : $D = \frac{4800}{10 \times (5+1)} = \mathbf{80 \text{ mesures}}$ par seconde, ce qui est suffisant pour une bonne précision.

Notre modulateur FSK

Nous avons choisi comme VCO un composant très fréquemment utilisé par les clubs espaces et recommandé par Planète-Sciences, le XR2206.



Figure 54 : XR2206

Voici le schéma électrique de l'environnement nécessaire pour effectuer la modulation FSK (on le trouve dans la datasheet et dans les ressources Planète-Sciences) :

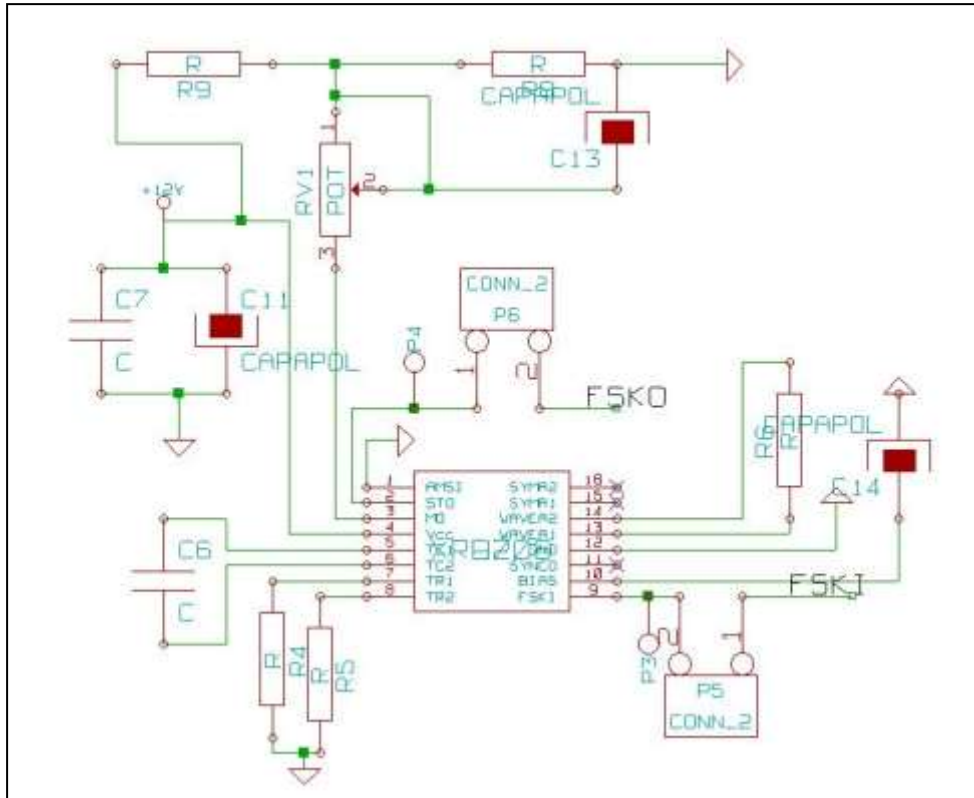


Figure 55 : Schéma électrique du XR2206

Les deux fréquences clé sont données par : $f_1 = \frac{1}{R4 \cdot C6}$ et $f_2 = \frac{1}{R5 \cdot C6}$. Il nous suffit donc de choisir des bonnes valeurs pour R4, R5 et C6 pour mettre nos deux clés de fréquences que nous avons choisies tout à l'heure.

Le potentiomètre RV1 en haut permet de régler la tension de sortie, conformément à la documentation de l'émetteur KIWI.

Fréquence modulante Fm	Qualité de réception						
	Très bonne						Médiocre
	Largeur de bande du récepteur ~ B						
	3Khz	6kHz	12kHz (NFM)	15kHz	30kHz	110kHz	220kHz (WFM)
1 kHz	0.1v	0.2v	0.4v	0.5v	1v	2v	5v
2 kHz		0.1v	0.2v	0.3v	1v	5v	5v
5 kHz					0.4v	5v	5v
10 kHz							5v
15 kHz							5v

Tableau 2 : optimisation amplitude sortie / fréquence modulante

Ici notre fréquence modulante Fm est 15 kHz (débit de 4800 bauds), nous devons donc régler RV1 pour que l'amplitude du signal de sortie du XR2206 soit 5V, comme indiqué dans le tableau ci-dessus.

Emetteur

Ce signal modulé est ensuite envoyé vers un émetteur haute fréquence, le KIWI, fourni par Planète-Sciences, qui effectue une modulation de fréquence du signal avec une porteuse de fréquence 138MHz environ.

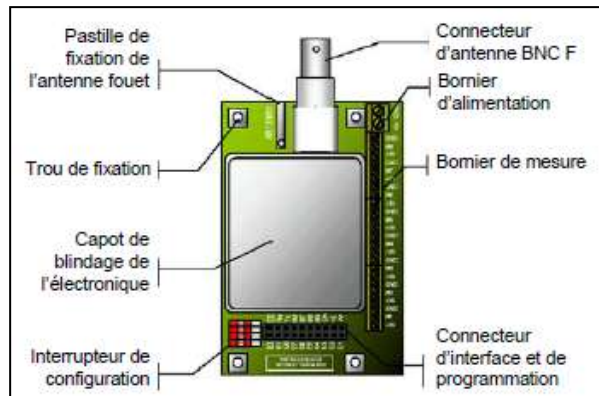


Figure 56 : Le KIWI

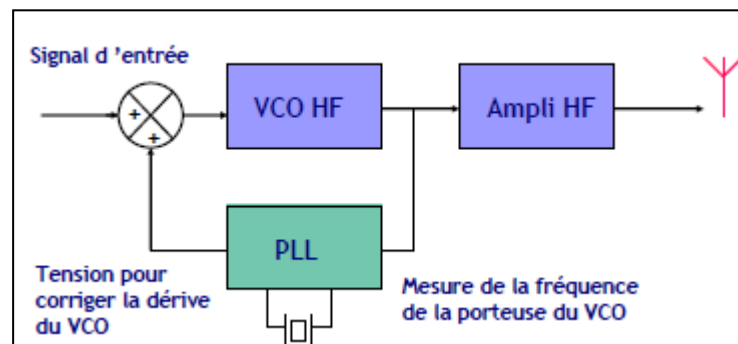


Figure 57 : Fonctionnement du Kiwi

Informations sur la configuration du Kiwi

Les ressources de Planète-Sciences sont très précises à ce sujet. Le KIWI va être fixé sur la carte électronique par des boulons et des écrous.

On fait rentrer le signal sortant du XR2206 (il arrivera par le connecteur carte à carte) sur l'entrée prévue sur le Kiwi.

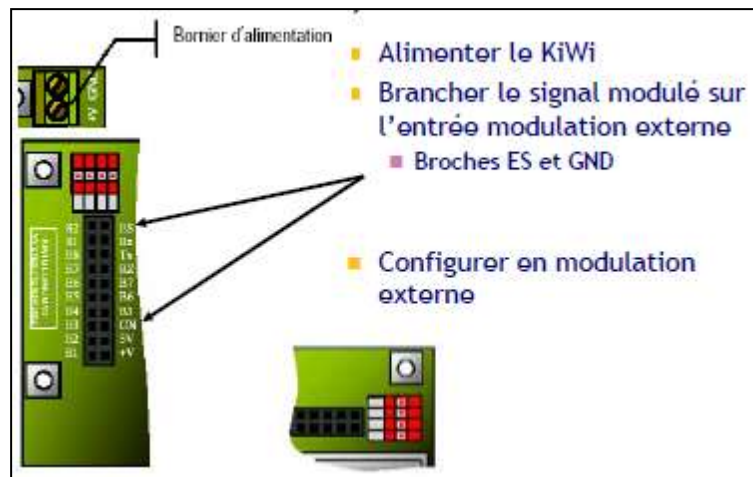


Figure 58 : zoom sur les connexions du Kiwi

Il faut mettre les interrupteurs (en rouge) dans la bonne position pour bien configurer le Kiwi comme on le veut.

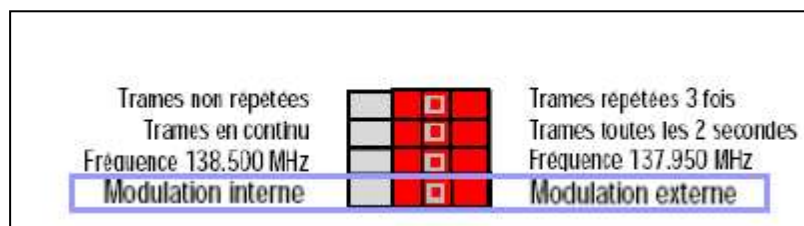


Figure 59 : position des interrupteurs

Temporisation du Kiwi

Si par malchance la fusée est introuvable après son atterrissage et que le Kiwi continue à émettre, c'est problématique car il occupe les plages de fréquences (il n'y en a que deux comme le montre la figure précédente), et empêche le lancement d'autres fusées. Il faudrait alors attendre que la batterie s'épuise ce qui peut durer longtemps.

Pour éviter cela, bien que cela ne soit pas obligatoire, nous avons choisi de mettre en place une temporisation qui coupera le Kiwi au bout d'une heure à partir du décollage.

On se sert d'un composant appelé relais et qui est une sorte d'interrupteur commandé en tension. Ce système est implémenté sur la carte du Kiwi. La temporisation débutera au moment du décollage et est programmée pour arrêter le Kiwi au bout de quelques dizaines de minutes.

Antenne

Le signal modulé haute fréquence en sortie du KIWI est émis vers le sol à travers une antenne de longueur $\lambda/4$, où λ est la longueur d'onde de l'onde utilisée, soit environ $\frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 138 \cdot 10^6} = \mathbf{54cm}$ environ.

L'antenne du Kiwi sera un tube situé à l'extrémité de l'ogive.

Réception des données

La réception des données au sol est réalisée par Planète-Sciences dans leur camion de télémesure. Ils nous fournissent des fichiers exploitables facilement avec les valeurs (en octets, binaires) qu'on aura transmises pendant le vol.

Analyse des données

Après la campagne de lancement qui aura lieu en août, nous devons analyser les données pour avoir les résultats de nos expériences et les interpréter. Nous avons le devoir envers Planète-Sciences de leur fournir un rapport sur ces résultats, qui viendra compléter ce rapport final de projet d'étude.

e. La mémoire

La mémoire utilisée pour stocker les données est une mémoire EEPROM 25LC1024-I/P de chez Microchip disposant d'une capacité de stockage de 1 Mbit, ce qui est amplement suffisant pour nos mesures.



Figure 60 : Mémoire EEPROM 1Mbit

Elle communique avec le microcontrôleur par une liaison SPI, de la même manière que les microcontrôleurs communiqueront entre eux. Il faudra donc prévoir un partage du temps entre la gestion des microcontrôleurs et la mémorisation des informations.

Le microcontrôleur permet ainsi d'écrire sur la mémoire pendant le vol ou de récupérer les données vers son port série pour les traiter sur un PC.

5. Gestion de la sécurité du vol

Notre électronique embarquée se doit de déclencher l'éjection du Ballon et l'ouverture du parachute au bon moment.

Ces fonctions et le contrôle qui leur est attaché sont réalisés au niveau de la carte située en bas de la case électronique, où se trouvent deux microcontrôleurs.

a. Instant d'apogée

L'instant **théorique** T_a de l'apogée sera déterminé par les **simulations** que la partie mécanique effectuera avec le logiciel Trajec, quand ils auront toutes les informations sur la fusée : taille exacte, poids, etc. Il est important que la simulation soit fiable pour pouvoir régler correctement les instants d'éjection du Ballon et d'ouverture du parachute.

Nous avons vu que nous avons aussi fait une **expérience** basée sur l'inclinométrie pour déterminer l'instant d'apogée, de façon expérimentale, ce qui sera bien plus précis si l'expérience réussit. Si l'apogée est effectivement détectée, un signal d'apogée sera envoyé aux deux microcontrôleurs : par SPI pour le ballon et par le biais d'une liaison directe pour le parachute.

b. Premier microcontrôleur : séquenceur Ballon

Le premier microcontrôleur a une fonction principale de **séquenceur** (« chronomètre ») : il doit compter le temps à partir du décollage et déclencher l'éjection du Ballon au bon moment.

A partir de l'instant théorique d'apogée, nous établirons une **fenêtre temporelle** en dehors de laquelle le Ballon ne pourra pas être éjecté, pour des raisons de sécurité.

De deux choses l'une :

- soit nous arrivons à détecter l'apogée grâce à notre expérience et que celle-ci a lieu pendant l'ouverture de la fenêtre temporelle ci-dessus ; alors le Ballon sera éjecté à ce moment.

- soit ce n'est pas le cas, et alors l'éjection du Ballon sera forcée à la fin de la fenêtre temporelle.

c. Deuxième microcontrôleur : séquenceur Parachute

Le deuxième microcontrôleur a aussi une fonction principale de séquenceur : il doit compter le temps à partir du décollage et déclencher l'ouverture du parachute au bon moment.

A partir de l'instant théorique d'apogée, nous établirons une fenêtre temporelle en dehors de laquelle le parachute ne pourra pas s'ouvrir, pour des raisons de sécurité. On laissera un temps de latence entre la possible éjection du Ballon et l'ouverture du parachute, évitant ainsi que le premier s'accroche dans le deuxième.

De deux choses l'une :

- soit nous arrivons à détecter l'apogée grâce à notre expérience, à un instant T , et que l'instant $T + 1s$ se trouve dans la fenêtre temporelle ; alors le parachute s'ouvrira une seconde après réception du signal d'apogée.

- soit ce n'est pas le cas, et alors le parachute s'ouvrira automatiquement à la fin de la fenêtre temporelle

d. Commande des servomoteurs

L'ouverture du parachute et l'éjection du Ballon passent par l'action de **servomoteurs**, que la partie mécanique se charge d'intégrer à la fusée.

Le premier est situé au niveau de la case parachute et son action va permettre l'ouverture de la porte de cette case contenant le parachute.

Les trois suivants se situent au niveau de la bague en tête du module propulseur. Ils permettent d'assurer le gonflage du ballon et le largage du ballon.

Le signal de contrôle des servomoteurs est un signal **PWM**, géré nativement par nos microcontrôleurs.

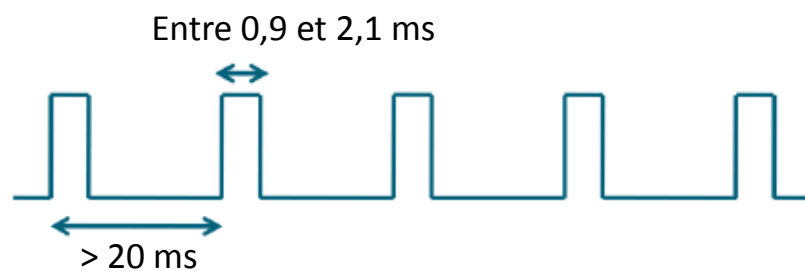


Figure 61 : signal PWM

L'angle de rotation du servomoteur est asservi en position: à 0,9ms correspond l'angle minimal, et à 2,1ms l'angle maximal, c'est pourquoi nous avons choisi d'utiliser des servomoteurs plutôt que des moteurs à courant continu. En effet avec un servomoteur moteur, le signal de commande indique directement l'angle que le servomoteur va tenter d'atteindre, alors que pour obtenir le même résultat avec des moteurs à courant continu, il aurait fallu déterminer le temps nécessaire au moteur pour effectuer la rotation désirée, et l'alimenter pendant cette durée. En cas de blocage dans le mécanisme, la rotation risquerait de s'arrêter avant d'avoir atteint l'angle désiré, contrairement à un servomoteur qui va continuer à travailler tant que l'angle correspondant à la commande n'est pas atteint.

e. Isolation électrique du séquenceur parachute : utilisation d'optocoupleurs

Le cahier des charges demande que le séquenceur parachute soit isolé électriquement du reste de la fusée, au cas où il y ait un problème dans le reste de l'électronique, pour que le parachute se déploie quand même.

Pour ce faire, nous utilisons des optocoupleurs, composants électroniques qui permettent de communiquer une tension entre l'entrée et la sortie sans qu'il y ait de contact électrique, de façon optique. Nous en mettons sur toutes les pistes servant à la communication SPI entre le microcontrôleur mère et le microcontrôleur séquenceur pour le parachute, et plus généralement sur chaque piste reliée au reste de l'électronique.



Figure 62 : optocoupleur

D'autre part, la carte électronique gérant la sécurité possède une alimentation indépendante.

f. Jack de déclenchement

Le signal de décollage est créé en utilisant une simple prise jack. Le côté femelle est accroché à la fusée, et le côté mâle à la rampe de lancement. Quand la fusée décolle, la rupture du contact électrique sera enregistrée par les deux microcontrôleurs séquenceurs qui commenceront alors leur comptage. Ce signal de déclenchement sera aussi réceptionné par le microcontrôleur mère.



Figure 63 : Prise Jack mâle

Le système de **jack de déclenchement** prend place en bas de la case électronique.

I. La réalisation des cartes électroniques

1. La conception des cartes

Fort de l'expérience acquise l'année dernière, nous avons engagé une nouvelle conception de cartes électroniques pour la fusée Zeppelin. Cette conception s'est menée parallèlement aux tests sur platine d'essais qui sont décrits dans la partie suivante.

Les outils utilisés sont similaires à ceux de l'année dernière, on utilise la suite *Kicad* qui permet de réaliser les schémas des circuits électroniques, puis de créer les typons associés c'est-à-dire la répartition réelle que vont avoir les composants et les pistes sur le circuit qui sera réalisé. Ils sont consultables en annexes 11, 12 et 13.

2. Les cartes tests

Nous avons testé notre architecture sur des platines d'essais. Elle nous a permis de visualiser les défauts et avoir des premiers retours sur les schémas électroniques que nous avons établis. Nous avons donc testé certaines parties de l'architecture logicielle et notamment la liaison SPI, les liaisons par optocoupleurs, les interruptions, etc. Comme nous avons axé notre démarche sur la communication entre les microcontrôleurs, nous avons réalisé une platine de test constitué de deux microcontrôleurs PIC18F252.

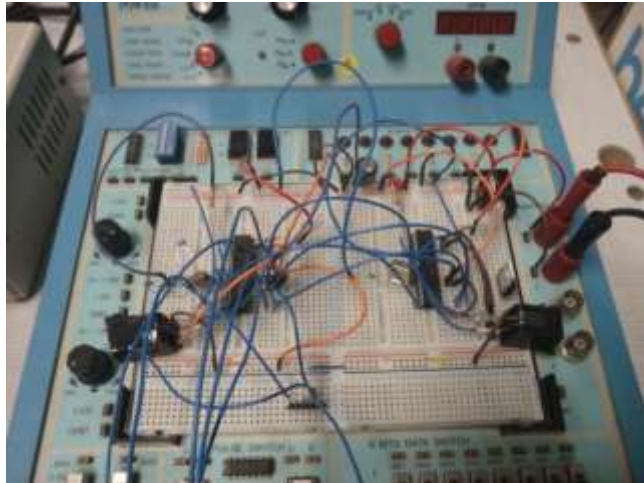


Figure 64 : Platine de test

3. Réalisation des cartes finales

Il s'agit de la dernière étape avant la programmation. Les plans des pistes que nous avons réalisés sous Kicad sont transférés par gravure sur des plaques d'époxy recouvertes d'une fine couche de cuivre sur chaque face. On obtient alors des pistes conductrices et des plans de masses (qui assurent une protection des circuits électroniques contre les perturbations électromagnétiques).

C'est une étape critique parce qu'elle nécessite beaucoup de temps de débogage. En effet, des erreurs de conception peuvent apparaître comme l'architecture n'a pu être testée que par blocs. A cela s'ajoute tous les problèmes autour de la gravure : des pistes trop rapprochées peuvent se relier, elles peuvent être coupées, etc. Le perçage et le soudage apporte aussi leur lot de difficultés : pastilles arrachées, soudure qui relie plusieurs pistes entre elles, etc.

Etant donné les risques très élevés de défauts sur les cartes, nous fixons tous les composants actifs qui sont les plus coûteux sur un support. Ainsi, les premiers tests des cartes se font sans ces composants pour limiter les risques.

Il est donc nécessaire de tester progressivement les cartes. D'abord, nous testons que tous les plans de masse sont bien reliés entre eux et à la masse commune des batteries. Nous testons ensuite toutes les alimentations. Par exemple, nous avons des court-circuits en sortie de régulateur à cause de pistes mal gravées. Lorsque nous sommes sûrs que toutes les masses et toutes les alimentations sont correctes, nous fixons les composants actifs sur leur support. En effet, ils ont moins de chance de griller s'ils sont correctement alimentés.

A partir de ce moment, on teste que tous les signaux externes arrivent bien à destination en programmant directement les microcontrôleurs avec des ordres simples. On rentre alors dans la phase de programmation.

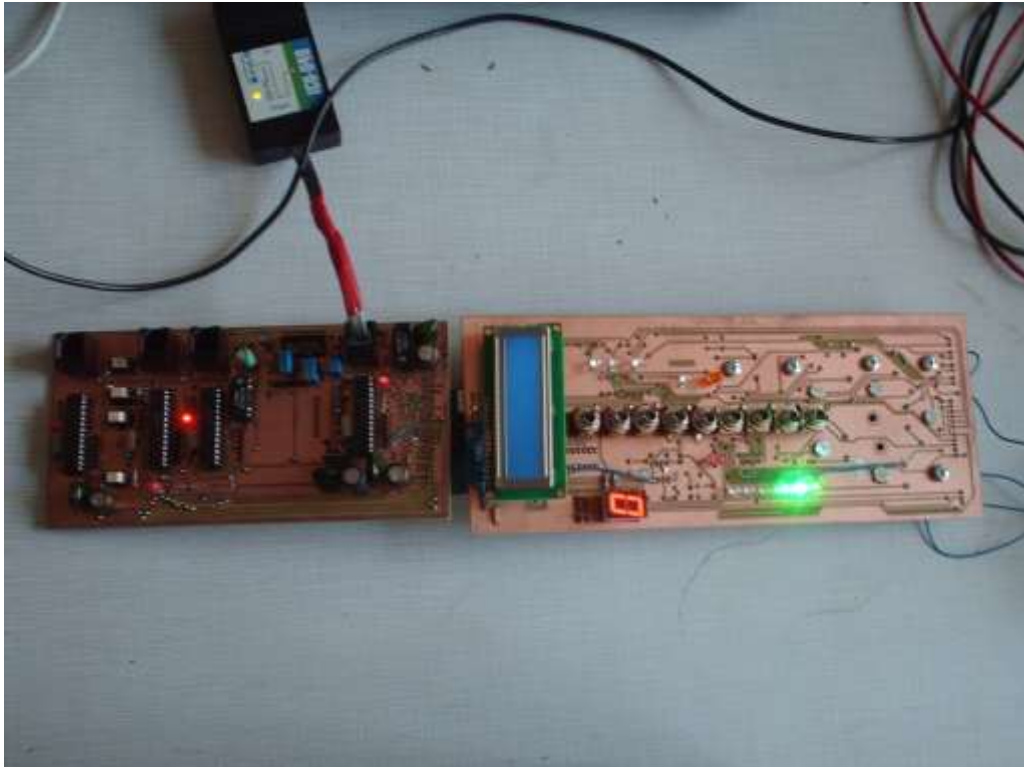


Figure 65 : Cartes finales en cours de programmation

4. Programmation

La deuxième grande partie du travail de réalisation de l'électronique est le développement des programmes qui une fois programmés dans les microcontrôleurs vont représenter l'intelligence de la fusée.

Le développement se fait en C et les programmes sont compilés par le compilateur PIC-C de chez CCS. Les microcontrôleurs sont programmés en par l'interface de programmation ICD-U40 qui se connecte en USB à l'ordinateur.

Nous élaborons dans un premier temps des petits programmes de test qui nous permettent de valider telle ou telle fonction : séquenceur, communication SPI, signal PWM, etc. Ensuite nous testons ces programmes sur les microcontrôleurs sur platine de test. Une fois validés, nous pouvons nous en servir pour développer des programmes plus longs qui seront à termes ce qui seront sur les cartes électroniques finales.

Nous nous servons beaucoup de la fonction debug du compilateur qui permet d'exécuter les programmes en pas à pas et de regarder les valeurs des variables dans le microcontrôleur.

La validation des programmes se fait aussi visuellement grâce aux LEDs ou à l'oscilloscope, et des modifications sont faites sans cesse sur les programmes au fur et à mesure que les tests avancent.

Partie D : Campagne de lancement

1. Problèmes lors des contrôles

Premièrement nous avons eu un problème de flèche statique, dû à un certain jeu présent au niveau de notre système de séparation. Nous avons contré ce problème en réduisant ce jeu à l'aide d'épaisseur de scotch placées entre la bague et les cales en U dans lesquelles passent les goupilles. Pour renforcer la structure dans son ensemble, nous avons aussi ajouté des profilés en T à l'extérieur de la fusée, vissés aux bagues.

Le second problème est un problème électrique. Le servomoteur choisi pour actionner le système de séparation demandait une forte puissance de la part des batteries, et suite à une erreur de conception, la batterie qu'il utilisait était la même que la batterie principale. L'actionnement du servomoteur conduisait à une chute de tension dans l'alimentation des microcontrôleurs ce qui perturbait aléatoirement la mise en œuvre du gonflage du ballon et de sa déconnexion. Nous avons résolu ce problème en ajoutant une batterie Li-Po dédiée pour ce servomoteur.

2. Lancement

Le lancement a eu lieu le vendredi matin, sous la pluie.

Le décollage s'est bien passé mais à cause d'un problème de temporisation, le parachute s'est ouvert beaucoup trop tard ce qui a provoqué son arrachement et la fusée a donc effectué un vol ballistique. De plus, l'ouverture du parachute étant un élément sine qua non de la séparation du bloc moteur, celle-ci n'a pas eu lieu et le ballon n'a donc pas été gonflé.

Le problème de temporisation vient du fait que la fenêtre temporelle autour de l'apogée théorique a été mal réglée par rapport à l'instant d'apogée théorique donné par le logiciel trajec. De plus, de la masse avait été rajoutée à la dernière minute avec la batterie supplémentaire, et n'a pas été prise en compte dans la simulation trajec.

Malheureusement, à cause du mauvais temps et de la végétation, nous n'avons pas réussi à retrouver notre fusée, ce qui aurait été utile pour savoir à quel niveau le parachute avait été arraché par exemple, et pour confirmer que la séparation n'avait pas eu lieu.

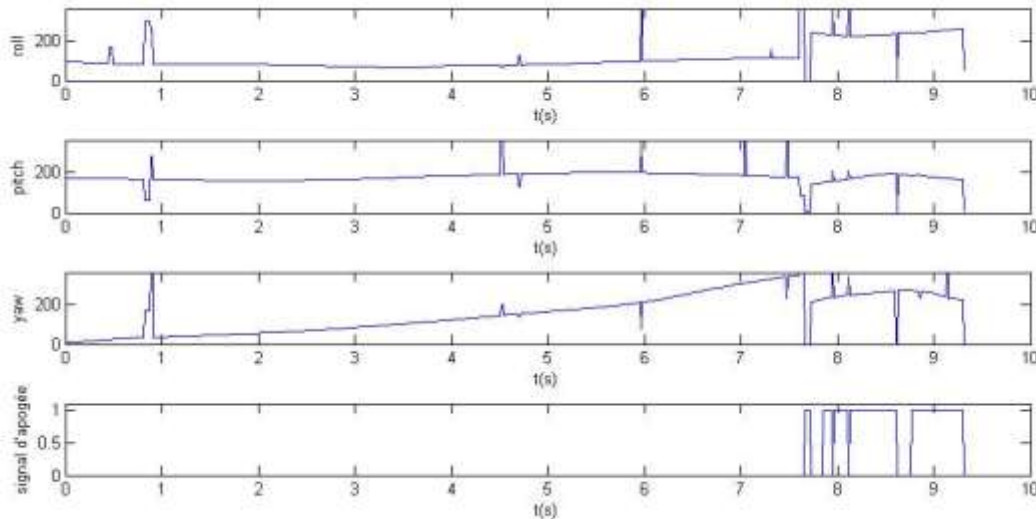
3. Exploitation des résultats

Nous n'avons pas pu récupérer la fusée mais nous avons quand même les résultats de la télémessure, qui a fonctionné. Nous avons pu les dépouiller.

Ci-dessous, les résultats de la centrale inertielle et de la détection d'apogée. On voit que la détection d'apogée a bien fonctionné : les signaux correspondant aux trois angles (roulis, lacet et tangage) sont

cohérents avec la théorie, et on voit bien une grosse variation aux alentours de 8 secondes après le décollage, qui correspond à l'apogée.

D'ailleurs on voit que le signal d'apogée a bien été envoyé suite à ces variations brusques.



La valeur des angles est donnée en degrés par rapport à la fusée à l'horizontale.

Les pics qui surviennent régulièrement sur les valeurs des angles sont à priori dus à des erreurs de communication entre la centrale inertielle et le microcontrôleur, ou des erreurs dues à la télémessure.

Aux alentours d'une seconde après le décollage, on a une variation brusque qui correspond à priori à la fin de la poussée du moteur.

D'après la courbe montrant l'évolution du roulis (roll, première courbe), on voit que notre fusée ne tournait presque pas sur elle-même, ce qui montre la bonne fabrication et la bonne fixation des ailerons sur le fuselage.

On voit bien sur la troisième courbe la fusée qui s'incline petit à petit (elle suit la parabole) jusqu'à l'apogée.

Conclusion

L'échec de notre expérience provient donc bien d'un mauvais calcul théorique de l'instant d'apogée, puisque celui-ci a été calculé à environ 14s alors que l'instant d'apogée réel fut à environ 8s, instant qui se trouvait hors de la fenêtre de sécurité et qui n'a donc pas déclenché l'ouverture du parachute, ce qui a été fatidique pour la réussite de notre expérience.

Ce mauvais calcul d'instant théorique est probablement dû au fait que nous atteignons les limites du logiciel Trajec avec une fusée assez lourde, et que nous avons oublié de prendre en compte une petite batterie et quelques fils rajoutés à la dernière minute, qui ont pu faire la différence étant donné la masse déjà importante.

Les conditions météo ont aussi pu influencer sur l'écart à la théorie du vol de Zeppelin.

Partie E : Autour de la réalisation de la fusée

I. Organisation au sein du projet

Pour ce qui est de l'organisation du groupe de travail, nous avons opté pour la séparation habituelle entre l'électronique et la mécanique. Alexis Tantot et Lucas Glénat travaillent sur la partie électronique (conception et réalisation des cartes, programmation) et Daria Burot, Aurélien Fresneau et Etienne Hodille s'occupent de la partie mécanique. D'autres tâches plus spécifiques ont pu être attribuées pendant l'année, comme par exemple la répartition sur les différentes cases, ou la réalisation de certaines pièces (commande numérique, pièces en plastique, ...). Cette répartition était le plus souvent proposée par le chef de projet.

Pour la gestion du temps, nous avons établi un diagramme Gantt en début d'année, consultable en annexe 3.

II. Budget

Les fonds utilisés par le projet proviennent de plusieurs sources. La majorité provient des BQP obtenus l'année dernière et qui n'avaient pas été utilisés. Une partie des dépenses est prise en charge par le BDE à travers la subvention que le club a reçue. L'électronique a été prise en charge par le département EEA. Un budget plus détaillé est fourni en annexe 78.

III. Communication

Des plaquettes de communication ont été réalisées au début du projet pour le présenter. La fusée sera montrée lors d'évènements tels que les soutenances de TFE ou autres occasions où un œil extérieur à l'école est présent.

Pour la campagne de lancement nous avons prévu d'obtenir un kakemono pour présenter le projet, notamment à l'occasion de la journée VIP où les élus locaux, ainsi que des gradés militaires et des scientifiques du CNES viennent voir ce qui se fait comme projet.

Nous avons pensé qu'il pourrait être intéressant de développer une activité de sponsoring auprès de fournisseurs (composants électroniques, matériaux brut) mais nous n'avons pas eu le temps de nous y plonger étant donné la quantité de travail que nous avons à faire à 5.

Conclusion

Une deuxième année de travail sur une fusée expérimentale s'achève. Les objectifs que nous nous étions fixés ont été plutôt bien atteints.

D'un point de vue technique, nous avons réalisé un travail de meilleure qualité que l'année dernière, que ce soit pour l'électronique ou la structure mécanique. L'expérience que nous avons acquise l'année dernière a vraiment été un plus et a été déterminante pour accomplir les défis que nous nous étions lancés.

Annexes

Annexe 1 : Commanditaires et organismes autour du projet



Le club fusée de l'École Centrale Lyon (Centrale Lyon Cosmos) a été formé en 2000 par des élèves passionnés par le secteur aérospatial. Il regroupe des élèves autour de ce domaine, et fait le lien avec les différents projets nationaux auxquels peuvent participer les écoles d'ingénieurs et les universités. Au sein même de l'école, il supervise ces projets et organise quelques activités comme la conception de fusées à eau.



Planète Sciences est une association proposant aux jeunes des activités scientifiques et techniques expérimentales, avec le soutien de grands organismes scientifiques et industriels. Allant de la découverte du secteur aérospatial pour les plus jeunes à la réalisation de fusées pour les étudiants, ces activités se font au travers de formations ou de concours dans un esprit de partage de connaissances. Planète Sciences nous suit également tout au long de notre projet, en nous apportant un support technique et humain.



Le Centre National d'Études Spatiales (CNES) est chargé de proposer au gouvernement la politique spatiale de la France au sein de l'Europe et de la mettre en oeuvre. S'agissant d'un établissement public, il a aussi un devoir de transmission des savoirs. C'est pourquoi le CNES se mobilise, depuis sa création, pour concevoir des programmes d'information vers des publics variés. Habilité à fournir du matériel nécessaire aux fusées expérimentales, c'est dans cette optique qu'il soutient Planète Sciences dans son souci de promotion du secteur aérospatial.

Annexe 2 : Présentation des membres du projet



Daria Burot



Lucas Glénat, chef de projet



Aurélien Fresneau

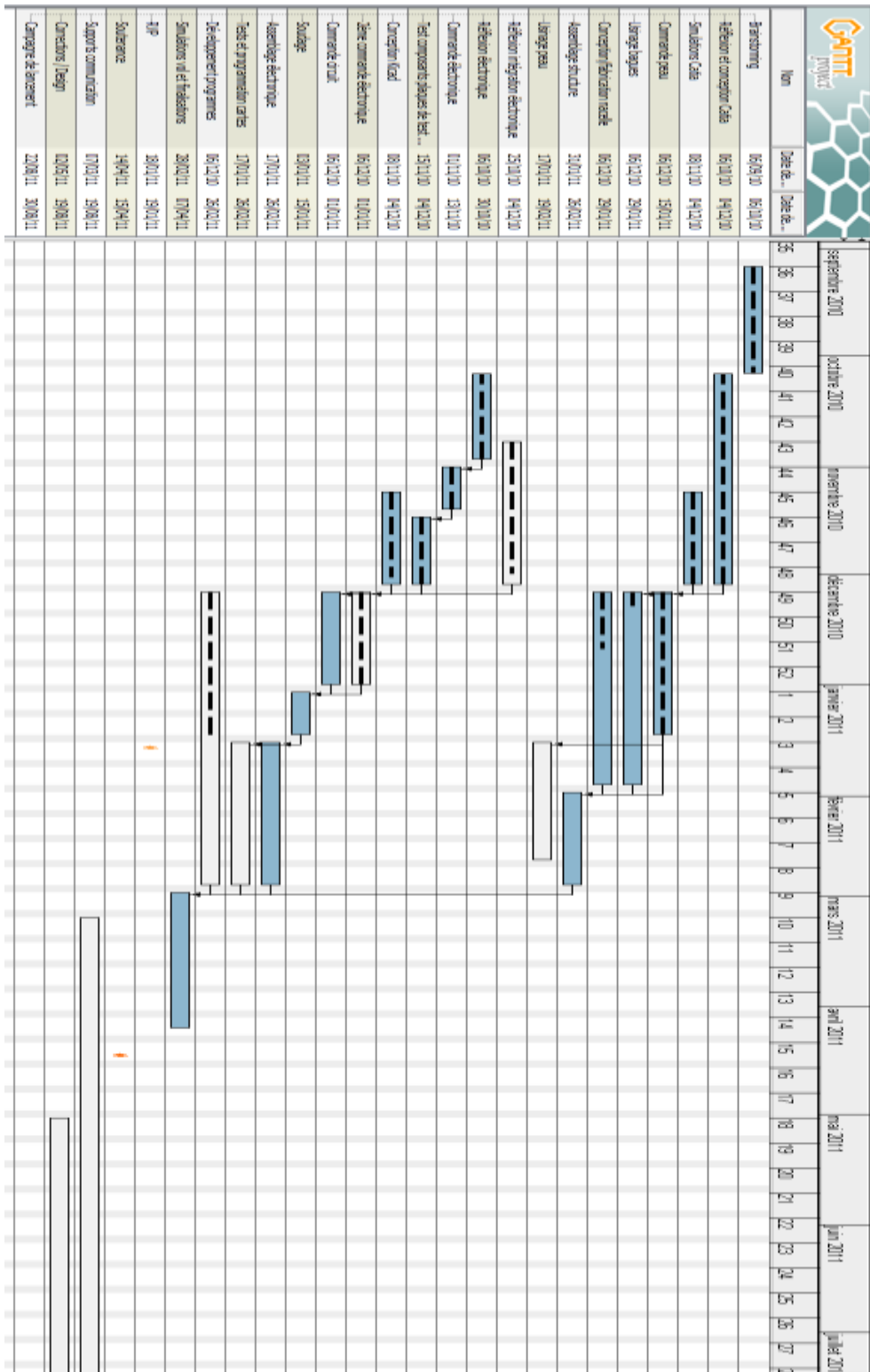


Etienne Hodille



Alexis Tantot

Annexe 3 : Diagramme Gantt



Annexe 4 : Budget

DEPENSES

MECANIQUE

tube polycarbonate	443,66
brut aluminium	62,19
ressorts	30,00
matériel pneumatique	488,53
total	1024,38

ELECTRONIQUE

composants	225,95
lextronic	266,22
composants RS	444,29
composants RS	40,64
module GSM	75,65
servomoteurs + boitiers	135,17
servomoteurs	150,00
total	1337,92

DEPENSES PREVISIONNELLES

caméra	31,90
chargeur batteries	128,95
bouteille hélium	165,05
total	325,90

total payé **2362,30**

total prévisionnel **2688,20**

CREDITS

BQP restants	1078,29
club fusée	600,00
département EEA	977,10
crédits PE	200,00

total crédits **2855,39**

Annexe 5 : Cahier des charges de Planète Sciences pour les fusées expérimentales (extraits)

Planète Sciences impose un cahier des charges très précis pour les fusées expérimentales. Nous vous présentons ici les extraits concernant la conception complète de la fusée, partie mécanique et électronique.

1. Définition de la fusée et de son environnement

Le CNES et PLANETE SCIENCES qualifient de fusée expérimentale toute fusée vérifiant les points suivants :

- Elle est développée dans le cadre de clubs amateurs par une équipe projet qui s'appuie sur une démarche expérimentale méthodique et sur une gestion de projet rigoureuse.
- Elle embarque une expérience, objectif principal du projet.
- Elle est propulsée par un seul moteur, délivré par le CNES.
- Sa conception doit permettre une mise en oeuvre et un lancement qui ne transgressent pas les règles de sécurité.
- Elle respecte le cahier des charges.

Remarque : La conception de moteurs spécifiques, certifiés par des professionnels et le CNES, peut être exceptionnellement envisagée.

Dans ce cas, elle fait l'objet d'un suivi de la part de Planète Sciences dans le cadre décrit par le cahier « Contrat moral ».

De plus, elle est lancée lors de la campagne nationale annuelle, après avoir passé avec succès les contrôles finaux décrits par la suite.

2. La structure mécanique

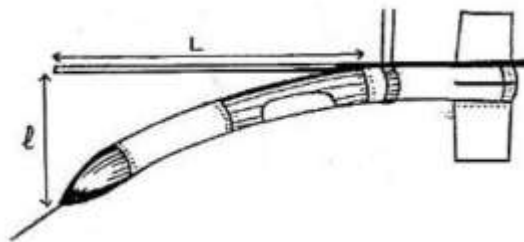
Ici sont présentés les différents points d'exigence sur la tenue structurelle générale de la fusée. Les critères évalués doivent être suffisamment simple pour que leur vérification soit faisable par les clubs eux-mêmes, c'est pourquoi ils sont simplifiés. Il en découle des marges de sécurité élevées.

DEROGATIONS : si le club pense pouvoir prouver que les critères pour son projet sont moins restrictifs il doit faire une demande de dérogation au cahier des charges. Cette dérogation ne sera donnée au club que s'il convainc PLANETE SCIENCES et les contrôleurs du bien fondé de sa demande.

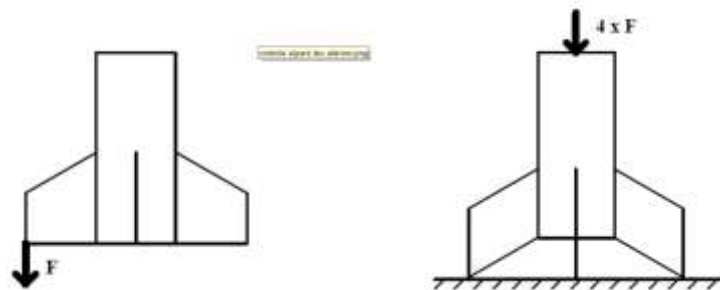
EXPLICATIONS de Planète Sciences	REGLES	CONTROLES
	1) Le club doit réaliser les plans mécaniques de chaque pièce ainsi que de l'intégration.	

<p>Une flèche stable est garant d'une bonne intégrité de la structure et permet de rester dans le domaine de validité du calcul de stabilité.</p>	<p>2) La flèche (voir figure 57) doit être inférieure à 1 %, soit 10 millimètres par mètre.</p>	
<p>Le meilleur exemple des problèmes de compression est celui de la canette de coca : une canette vide en bon état supporte largement votre propre poids si vous montez dessus. Par contre si elle possède une bosse ou un petit trou, elle s'écrase violemment. Donc une ouverture dans la peau peut entraîner des problèmes de tenue en compression.</p>	<p>3) Chaque élément de la fusée doit pouvoir supporter une compression équivalente à $F=2.AM.Msup$ où AM est l'accélération maximale de la fusée et $Msup$ est la masse de la partie supérieure à l'élément en question.</p>	
	<p>4) Les ailerons doivent pouvoir supporter une force longitudinale de $F=2.Maileron.AM$ où $Maileron$ est la masse d'un aileron.</p>	
<p>Pour rester stable, la fusée a besoin de garder ses ailerons bien positionnés. Un aileron peut supporter les effets longitudinaux et transversaux tout en pliant, d'où le critère de flèche des ailerons. Plus il y aura de soin apporté dans l'alignement des ailerons, moins votre fusée aura de chances de tourner autour de son axe pendant le vol.</p>	<p>5) Une force $F=0.104.Saileron.Vmax^2$ où $Saileron$ est la surface d'un aileron et $Vmax$ est la vitesse maximale de la fusée, doit entraîner une flèche transversale des ailerons inférieure à 10° (voir figure 58).</p>	<p>La force est appliquée au centre de gravité des ailerons. On contrôle simultanément deux ailerons diamétralement opposés en appliquant le double de la force F. On doit alors avoir $d \leq \tan^{-1}(10^\circ)$.</p>
	<p>6) L'angle entre deux ailerons consécutifs doit être de 90° à 10° près (voir figure 59)</p>	
	<p>7) L'alignement de deux ailerons en vis-à-vis doit être vérifié à une précision de moins de 1° (voir figure 60)</p>	
<p>Aucun contrôle suffisamment simple ne permet de garantir la résistance des ailerons composites au passage du Mach.</p>	<p>8) Les ailerons ou les fixations d'ailerons en matériaux composites sont interdits pour les fusées dont la vitesse dépasse Mach 0,8, sauf</p>	<p>On vérifiera que la vitesse maximale des fusées ayant des ailerons ou des fixations d'ailerons en matériaux composites est inférieure à</p>

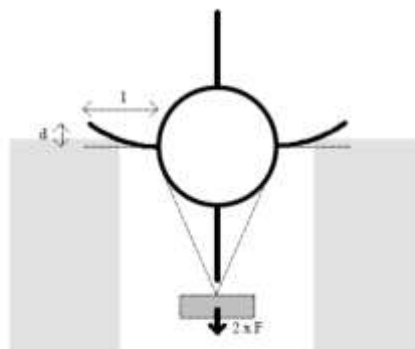
	justification du club agréé par Planète Sciences (cf. dérogations).	Mach 0.8.
Pour des raisons de stabilité, il est important que le centre de gravité ne soit pas trop modifié pendant le vol.	9) Tous les éléments de la fusée doivent rester fixés durant toute la durée du vol. Toutefois, le largage ou l'éjection d'éléments peut être envisagé dans le cadre d'une expérience argumentée.	La fusée sera secouée vivement de façon manuelle. Les masses importantes comme les moteurs électriques devront résister à une force équivalente à 1.5 fois sa masse multipliée par l'accélération maximale de la fusée.



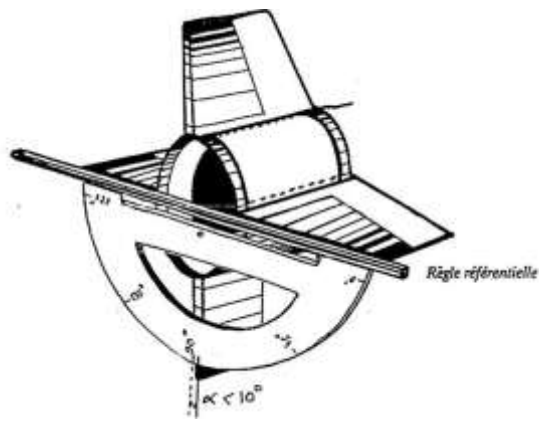
Contrôle de la flèche



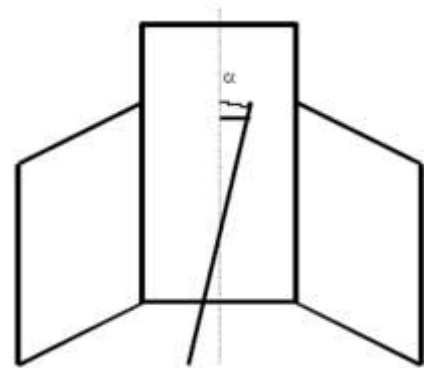
Contrôle de la résistance longitudinale des ailerons



Contrôle de la résistance transversale des ailerons



Contrôle de la perpendicularité des ailerons



Contrôle de l'alignement des ailerons

3. Stabilité de la fusée

Ici sont définies toutes les règles de stabilité générales de la fusée, qui seront vérifiées à l'aide des logiciels Stabilito et Trajecto fournis par Planète Sciences.

REGLES :

- 1) La vitesse en sortie de rampe doit être supérieure à 20 m/s.
- 2) La finesse, définie par le rapport entre la longueur totale sans antenne et le plus grand diamètre de la fusée, doit être comprise entre 10 et 35.
- 3) La portance, doit être comprise entre 15 et 40.
- 4) La marge statique doit être comprise entre 2 et 6.
- 5) Le produit entre la portance et la marge statique doit être comprise entre 40 et 100.

CONTRÔLES :

La stabilité sera vérifiée à l'aide du logiciel de trajectographie de Planète Sciences. Seuls ses résultats feront foi. Si la fusée n'est pas modélisable par ce logiciel, le club devra présenter un calcul de stabilité dans le dossier de conception.

4. Compatibilité avec la rampe de lancement et le propulseur

REGLES

- 1) La fusée doit être compatible avec au moins une des quatre rampes disponibles. Leurs caractéristiques sont fournies.
- 2) Toutes les fusées doivent avoir quatre ailerons identiques.

- 3) Les zones devant être accessibles (interrupteurs, voyants...) doivent se trouver à $\pm 20^\circ$.
- 4) D'éventuels éléments éjectés doivent se trouver dans une zone accessible autre que celle de signalisation ou de mise en oeuvre.
- 5) La fusée doit être prévue pour être introduite horizontalement sur la rampe.
- 6) L'angle des cordons arrachables doit être compris entre 5 et 30° .
- 7) Les interrupteurs de mise en oeuvre doivent être accessibles de l'extérieur de la fusée, sans démontage.
- 8) En rampe, le diamètre extérieur de la fusée devra être le même tout au long de la fusée entre le bas du cône et le bas du moteur.
- 9) Le contact entre le moteur et la plaque de poussée doit être plan.
- 10) Le goujon du moteur sera vissé sur la plaque de poussée. Il ne devra supporter aucun effort dû à la propulsion.
- 11) Les impératifs spécifiques à chaque propulseur, décrits dans le cahier propulseur, devront être respectés.
- 12) Les fusées équipées d'un rétreint à l'arrière du moteur doivent laisser une zone d'accessibilité de diamètre supérieure à quatre-vingt millimètres derrière la tuyère afin que le pyrotechnicien puisse facilement mettre en place la canne d'allumage.

CONTRÔLES :

Mesures et pesées correspondantes.

5. Le système de récupération

a. Le système de récupération dans son ensemble

EXPLICATIONS de Planète Sciences	REGLES	CONTROLES
Le but est de récupérer la fusée en bon état.	1) La fusée doit être équipée d'un système ralentisseur fiable permettant de réduire sa vitesse de descente. L'éjection du ralentisseur doit être franche.	On vérifiera le fonctionnement du système de récupération en simulant le vol de la fusée. Ce contrôle sera spécifique au système de récupération employé et sera réalisé 3 fois successives pour s'assurer de la fiabilité du système.
2) et 3) La descente de la fusée doit être suffisamment lente pour que l'atterrissage se fasse en douceur, mais elle doit aussi être suffisamment rapide pour éviter un éloignement trop important de la fusée portée	2) Le système ralentisseur doit permettre une arrivée au sol à moins de 15 m/s.	On calculera la vitesse de descente V_d d'un parachute comme suit : V_d est calculée en utilisant la formule : $V_d = \sqrt{\frac{2Mg}{\rho_0 C_x S'}}$ où M est la masse en kg de la fusée avec un

par le vent, entraînant une sortie du gabarit autorisé. On général, on a $V_d > 8 \text{ m/s}$.		propulseur vide, S est la surface du parachute déployé, $g = 9,81$, $C_x = 1$ et $\rho_0 = 1,3$.
	3) La fusée doit descendre suffisamment rapidement pour rester dans le gabarit autorisé.	Calcul du temps de descente (à partir de V_d .
En général, les clubs choisissent de déployer leur ralentisseur à culmination cas c'est à ce moment-là que les contraintes qui s'exercent sur ce système sont les plus faibles.	4) L'instant de déploiement du système ralentisseur doit être compatible avec l'expérience menée par le club.	On mesurera l'instant effectif de déploiement du ralentisseur et on vérifiera qu'il correspond bien à l'objectif du club.
	5) Le club doit réaliser les plans des différents éléments mécaniques du système de récupération et de leur intégration.	Vérification de l'existence de ces plans dans le dossier de conception.

b. L'efficacité du système de libération du ralentisseur

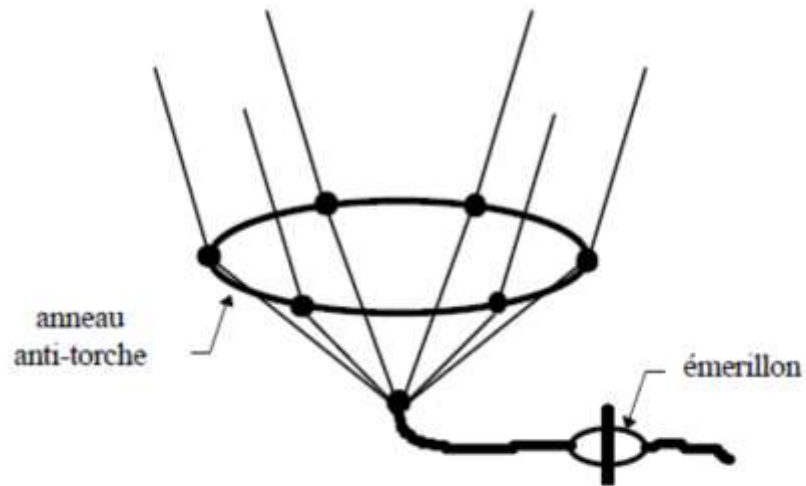
EXPLICATIONS de Planète Sciences	REGLES	CONTROLES
Système de type 'séparation transversale'		
L'objectif est de s'assurer que le ralentisseur sera libéré après que le séquenceur en ait donné l'ordre.	1) La fusée doit être équipée d'un dispositif qui permet, lors de la séparation transversale, de dégager l'emboîtement des deux parties de la fusée, en soulevant le poids de la partie supérieure.	La fusée étant posée verticalement, ogive vers le haut, on vérifie qu'à la séparation les deux parties de la fusée se déboîtent l'une de l'autre.
	2) Utilisation de coquilles : Si le parachute est contenu dans des coquilles, la fusée doit être équipée d'un dispositif qui permet, lors de la séparation transversale, de faire sortir les coquilles contenant le parachute d'au moins la moitié de leur longueur, en soulevant le poids de la partie supérieure de la fusée.	La fusée étant posée verticalement, ogive vers le haut, on vérifie qu'à la séparation les coquilles contenant le parachute sortent d'au moins la moitié de leur longueur.
Système de type 'porte latérale'		
	3) La case contenant le système de récupération doit rester opérationnelle lorsqu'elle supporte en compression longitudinale une force $F = 2 \text{Accéléraion}_{max} M_{sup}$.	Une feuille de papier est calée dans l'ouverture de la case (dans le sens de la hauteur), le contrôleur applique une force équivalente à $2 \text{Accéléraion}_{max} M_{sup}$ à l'extrémité supérieure de la

		case parachute, le contrôle est positif si la feuille de papier n'est pas déformée.
	4) En position fermée, la porte latérale ne doit pas dépasser du profil de la fusée.	On pose une règle sur la porte latérale en position fermée. Les deux extrémités de la règle doivent toucher la peau de la fusée.
	5) La porte ne doit pas s'ouvrir ou se bloquer lorsqu'on applique un couple de torsion de 1 N.m entre le haut et le bas de la fusée.	Le bas de la fusée étant fixé, on applique un couple de 1 N.m en haut de la fusée dans un sens puis dans l'autre (par exemple en suspendant un poids de 1 kg à 10 cm de l'axe de la fusée grâce à une clef de filtre à huile à ruban).

e. Le ralentisseur

EXPLICATIONS de Planète Sciences	REGLES	CONTROLES
Lors du calcul de la vitesse à l'ouverture parachute, on considère la période [T-10%, T+10%] et non l'instant T, pour tenir compte des imperfections du logiciel de trajectographie.	1) Le ralentisseur doit être suffisamment solide pour résister au choc à l'ouverture.	Utilisation d'un parachute : Force maximale à l'ouverture : $F = 0,5 * 1,3 S V_{apogée}^2$ Où : $V_{apogée}$ est la vitesse à l'apogée (en m/s) S est la surface dépliée du parachute (en m ²) · <i>suspentes du parachute</i> : Chaque suspente doit supporter une force égale à $\frac{2 * 2 * F}{\text{Nombre de suspentes}}$ (coefficient de sécurité de 2, et on considère que seulement la moitié des suspentes travaillent à l'ouverture parachute). · <i>sangle, émerillon, fixation à la fusée</i> : ils doivent supporter une force de 2 * F (coefficient de sécurité de 2).
Un anneau anti-torche est un anneau dans lequel passe chacune des suspentes, et qui leur évite de s'emmêler en les maintenant écartées. Cet anneau permet de tendre toutes les suspentes, ce qui rend plus efficace l'émerillon et	2) Dans le cas de l'utilisation d'un parachute, celui-ci doit être équipé d'un anneau anti-torche (figure xx).	Vérification de la présence d'un anneau anti-torche ou d'un émerillon.

évite ainsi la mise en torche du parachute. Il doit pouvoir glisser le long des suspentes, et ne doit pas être coupant.		
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--



Anneau anti-torche

Annexe 6 : Fiche d'avancement du projet (suivi de Planète Sciences)



FEUILLE DE POURCENTAGE



2010-2011

Nom du Projet	Zeppelin	Date de mise à jour	
---------------	-----------------	---------------------	--

Type de projet	FUSEX	Pourcentage atteint	36 %
----------------	--------------	---------------------	-------------

Définition d'expérience	8,875
Mécanique	0
Expérience	10
Télémessure / Stockage	0

Stabilité	5
Séquenceur	7,5
Informatique	4,5
Général	0

Tous les documents dont il est question ici sont des documents internes au projet. Les fiches Planète-Sciences n'en font pas partie

Pour remplir cette fiche, mettre un 'x' dans les cases (ou un chiffre quand c'est demandé)

Définition d'expérience		Total			8,87 / 1 5 / 0	
		Commentaires :				
		Rappel :				
<i>Il existe un document (autre que les fiches Planète-Sciences) ...</i>		0 %	50 %	100 %	Ma	Ré
		NON	Partiel	OUI	x.	el
... décrivant le but de/des expériences				x	2,0 0%	2,0 0%
... consignant les expériences principales et secondaires				x	2,0 0%	2,0 0%
		Total :			4,0 0%	4,0 0%
<i>Pour les expériences principales ...</i>						
... combien de paramètres physiques sont mesurés à bord :		4				
		0 %	75 %	100 %		
		NON	OUI	Partiel		

Il existe un doc consignnant pour le ...					Ma x.	Ré el
...paramètre 1: Variation des angles (3 axes)						
Domaine de variation				x	0,2 5%	0,2 5%
Précision attendue				x	0,2 5%	0,2 5%
Grandeur effectivement mesurée				x	0,2 5%	0,2 5%
Formule de conversion (Mesure > Paramètre)				x	0,2 5%	0,2 5%
Evaluation des erreurs de mesures	x				0,2 5%	0,0 0%
Méthode d'étalonnage				x	0,2 5%	0,2 5%
...paramètre 2: pression (ballon)						
Domaine de variation				x	0,2 5%	0,2 5%
Précision attendue				x	0,2 5%	0,2 5%
Grandeur effectivement mesurée				x	0,2 5%	0,2 5%
Formule de conversion (Mesure > Paramètre)				x	0,2 5%	0,2 5%
Evaluation des erreurs de mesures				x	0,2 5%	0,2 5%
Méthode d'étalonnage	x				0,2 5%	0,0 0%
...paramètre 3: température (ballon)						
Domaine de variation			x		0,2 5%	0,1 9%
Précision attendue	x				0,2 5%	0,0 0%
Grandeur effectivement mesurée				x	0,2 5%	0,2 5%
Formule de conversion (Mesure > Paramètre)				x	0,2 5%	0,2 5%
Evaluation des erreurs de	x				0,2	0,0

Exemple :
 - Paramètre = Altitude
 - D de Variation : 0m → 750m
 - Précision : ± 3m
 - Mesure : Press° Atmosphérique
 - Altitude (m) = $3,14 \times P$ (en Pa)
 - Erreur : ± 1,414Pa soit 4,4m
 - Méthode : 6 pts au manomètre

Rappel :
 - un paramètre peut être mesuré en plusieurs point de la Fusex câd 1 paramètre = pls capteurs

mesures					5%	0
						0,1
Méthode d'étalonnage			x		0,2 5%	9 %
...paramètre 4: position du ballon						
Domaine de variation				x	0,2 5%	5 %
Precisison attendue				x	0,2 5%	5 %
Grandeur effectivement mesurée				x	0,2 5%	5 %
Formule de conversion (Mesure > Paramètre)				x	0,2 5%	5 %
Evaluation des erreurs de mesures				x	0,2 5%	5 %
Méthode d'étalonnage				x	0,2 5%	5 %
...paramètre 5: -						
Domaine de variation		-	-	-		
Precisison attendue		-	-	-		
Grandeur effectivement mesurée		-	-	-		
Formule de conversion (Mesure > Paramètre)		-	-	-		
Evaluation des erreurs de mesures		-	-	-		
Méthode d'étalonnage		-	-	-		
...paramètre 6: -						
Domaine de variation		-	-	-		
Precisison attendue		-	-	-		
Grandeur effectivement mesurée		-	-	-		
Formule de conversion (Mesure > Paramètre)		-	-	-		
Evaluation des erreurs de mesures		-	-	-		
Méthode d'étalonnage		-	-	-		
Total :					6,0	4,8 8 %

Mécanique

1
Total : 0 / 5

Commentaire
s: -

Combien de bagues mécaniques comportent le projet :		0 %	50 %	100 %	Ma x.	Ré el
		Non fait	Réalisée	Intégrée		
Nom bague 1:	plaque de poussée		x			
Nom bague 2:	bagues séparation bloc-moteur		x			
Nom bague 3:	bagues éléments pneumatiques (ballon)		x			
Nom bague 4:	bague de connexion inter-cases		x			
Nom bague 5:	bagues propu (centrage et retenue)	x				
Nom bague 6:	bague de coiffe		x			
Total :					4,0	0%
		0 %	75 %	100 %	Ma x.	Ré el
		NON	Partiel	OUI tout		
L'ogive est-elle réalisée ?			x		4,0	3,0
Les pièces de structure interne sont-elles réalisées ?				x	2,0	0,0
Les peaux sont-elles réalisées ?				x	2,0	0,0
Total :					8,0	7,0
		0 %	25 %	100 %	Ma x.	Ré el
		testable	NOK	OK		
Résultat de la compatibilité propulseur		x				
Total :					3,0	0,0
Expérience						1
Total :						10 / 6
Commentaires :						-
Combien de carte élec comporte le projet (hors séquenceur) :		2				

Rappel

- Principale : mon projet n'a pas

lieu d'être sans.

- Secondaire : non vital au projet

		0 %	50 %	100 %		
		Non fait	Carte Réalisée	Carte Testée	Ma x.	Ré el
Carte élec 1:	Carte Alim			x	3,00 %	3,00 %
Carte élec 2:	Carte expérience			x	3,00 %	3,00 %
Carte élec 3:	-					
Carte élec 4:	-					
Carte élec 5:	-					
Carte élec 6:	-					
Total :					6,00 %	6,00 %

Rappel
: "Doc. Minimale" = impression de
- Schéma électrique
- Routage
- Plan d'implantat° des compo dans la version de la carte actuelle

		0 %	75 %	100 %		
		NON	Partiel	OUI	Ma x.	Ré el
Il existe un ...						
... plan de câblage général de toutes les cartes				x	3,00 %	3,00 %
... plan précisant l'intégration électronique / mécanique				x	1,00 %	1,00 %
Total :					4,00 %	4,00 %

Etalonnage des capteurs ...

Combien de capteurs comporte le projet :

3

		0 %	75 %	100 %		
		Non Etalonné	≤3 pts	≥3 pts	Ma x.	Ré el
Capteur 1:		x			2,00 %	0,00 %
Capteur 2:		x			2,00 %	0,00 %
Capteur 3:		x			2,00 %	0,00 %
Capteur 4:	-					

Rappel
: "Doc. Minimale" = impression de
- Schéma électrique
- Routage
- Plan d'implantat° des compo dans la version de la carte actuelle

-Capteur 5:	-					
-Capteur 6:	-					
Total :		6,0	0%	0	0	%

Télémesure / Stockage **Total : 0 / 2**

		NON	OUI				Commentaires :
<i>Le projet comporte ...</i>							
... une télémesure			x				
... une sauvegarde des données installée dans la fusée			x				
<i>Pour la télémesure ...</i>		0 %	25 %	100 %			
Démonstration de [codage / émission / réception / décodage]		impossible	Test - NOK	Test - OK	Max.	Réel	
		x					
		Total :		6%	0,0	0	%
<i>Pour le stockage ...</i>		0 %	25 %	100 %			
Démonstration de [codage / émission / réception / décodage]		impossible	Test - NOK	Test - OK	Max.	Réel	
		x					
		Total :		6%	0,0	0	%

Stabilité **Total : 5 / 8**

		Valeur (0 si pas calculé)			Critère					Commentaires :
		Pas calculé	NOK	OK			Max.	Réel		
		0 %	50 %	100 %						
Vitesse de sortie de rampe :							1,0	0	0 %	
							x	1,0	1,0	
Finesse :							x	1,0	1,0	

		35				0%	0%
Portance :	15,7	$10 \leq Cn \leq 40$			x	1,00%	1,00%
Marge Statique :	5,08	$2 \leq Ms \leq 6$			x	1,00%	1,00%
Produit Ms x Cn :	79,756	$40 < MsxCn (< 100)$			x	1,00%	1,00%
						Total :	5,00%
			0%	50%	100%		
			Non fait	Réalisés	Fixés	Ma x.	Ré el
Avancement des ailerons ...			0				
						Total :	3,00%

Séquence						2	
ur						Total : 7,5 / 0	
						Commentaires :	
						demande de dérog pour la vitesse de descente: 5m/s	
<i>Etat d'avancement de/du ...</i>						0%	
						Plan	Réalisé
						Intégré	
						Ma x.	Ré el
... toutes les pièces mécaniques relatives au système d'ouverture							1,50%
... parachute						x	3,00%
							1,00%
						x	2,00%
						Total :	2,50%
						0%	
						Non fait	Réalisés
						soudée	testée
La minuterie est au stade ...							
						x	
						Total :	5,00%

Rappel :
Intégrat° parachute = compatibilité avec la case parachute.

	0 %	50 %	100 %		
	NOK	1 fois	3 fois	Ma x.	Ré el
Test totalement intégré du système de récupération	x				
Total :				10,00 %	0,00 %

Rappel :
Ce test comprend Jack / Accéléro jusqu'à la sortie du parachute

Informatique **Total : 4,5 / 6**

Combien de microcontrôleur comporte la fusée ?		0 %	75 %	100 %		
Etat d'avancement du programme pour ...		Non fait	carte finale	microcontrôleur la fusée	Ma x.	Ré el
Nom microcontrôleur 1 :	séquenceur		x		1,20 %	0,90 %
Nom microcontrôleur 2 :	état		x		1,20 %	0,90 %
Nom microcontrôleur 3 :	général		x		1,20 %	0,90 %
Nom microcontrôleur 4 :	libération ballon		x		1,20 %	0,90 %
Nom microcontrôleur 5 :	mesure ballon		x		1,20 %	0,90 %
Nom microcontrôleur 6 :	-					
Total :					6,00 %	4,50 %

Général **Total : 0 / 3**

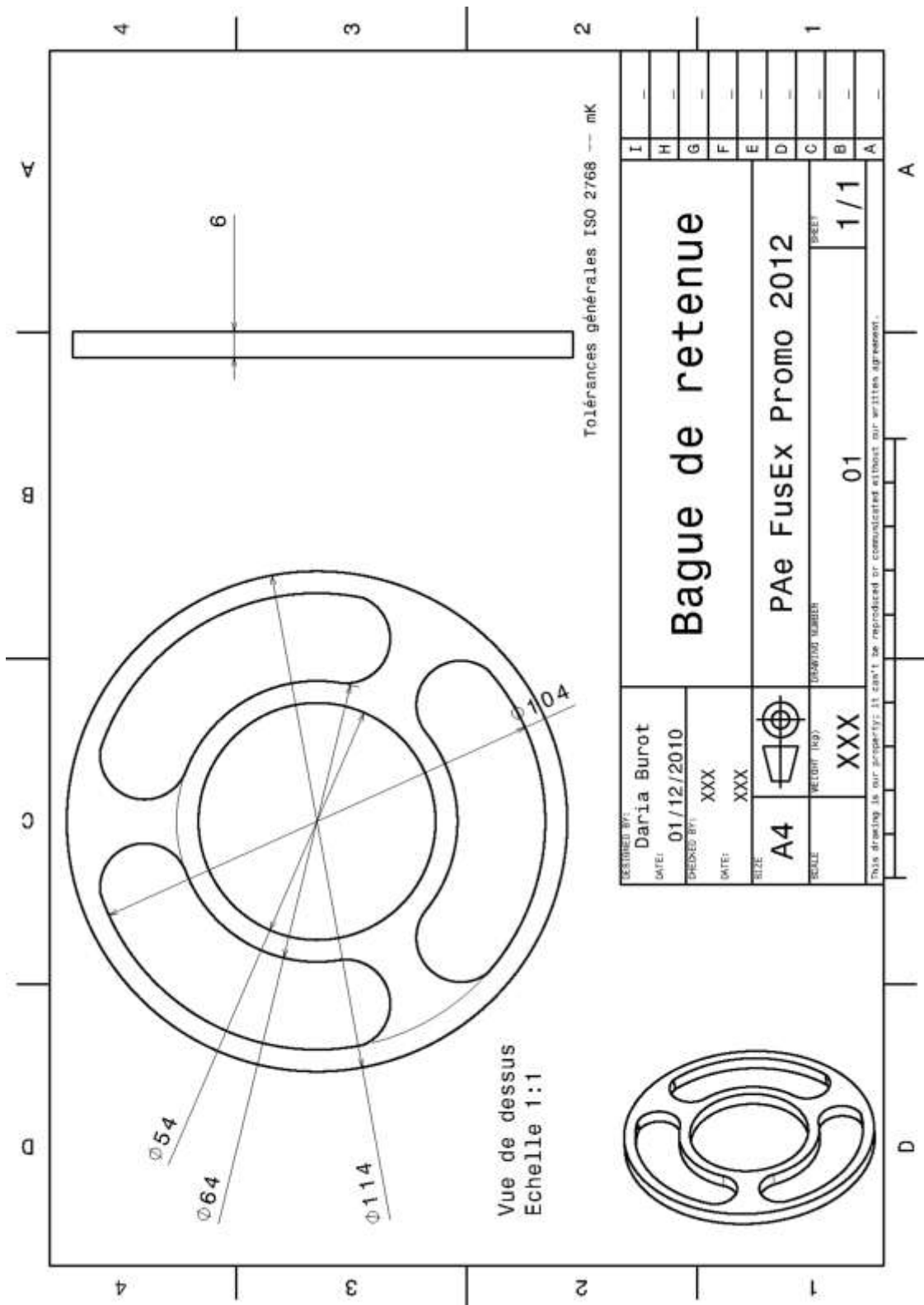
	0 %	50 %	100 %		
	NON	Partiel	OUI	Ma x.	Ré el
Le câblage inter-cartes est-il réalisé ?			x	4,00 %	4,00 %
La fusée fonctionne-t-elle avec sa source d'énergie finale (Piles ...)	x			5,00 %	0,00 %
La compatibilité rampe est-elle bonne				2,00 %	

Rappel :
Compatibilité rampe = jack, inter, Ailerons

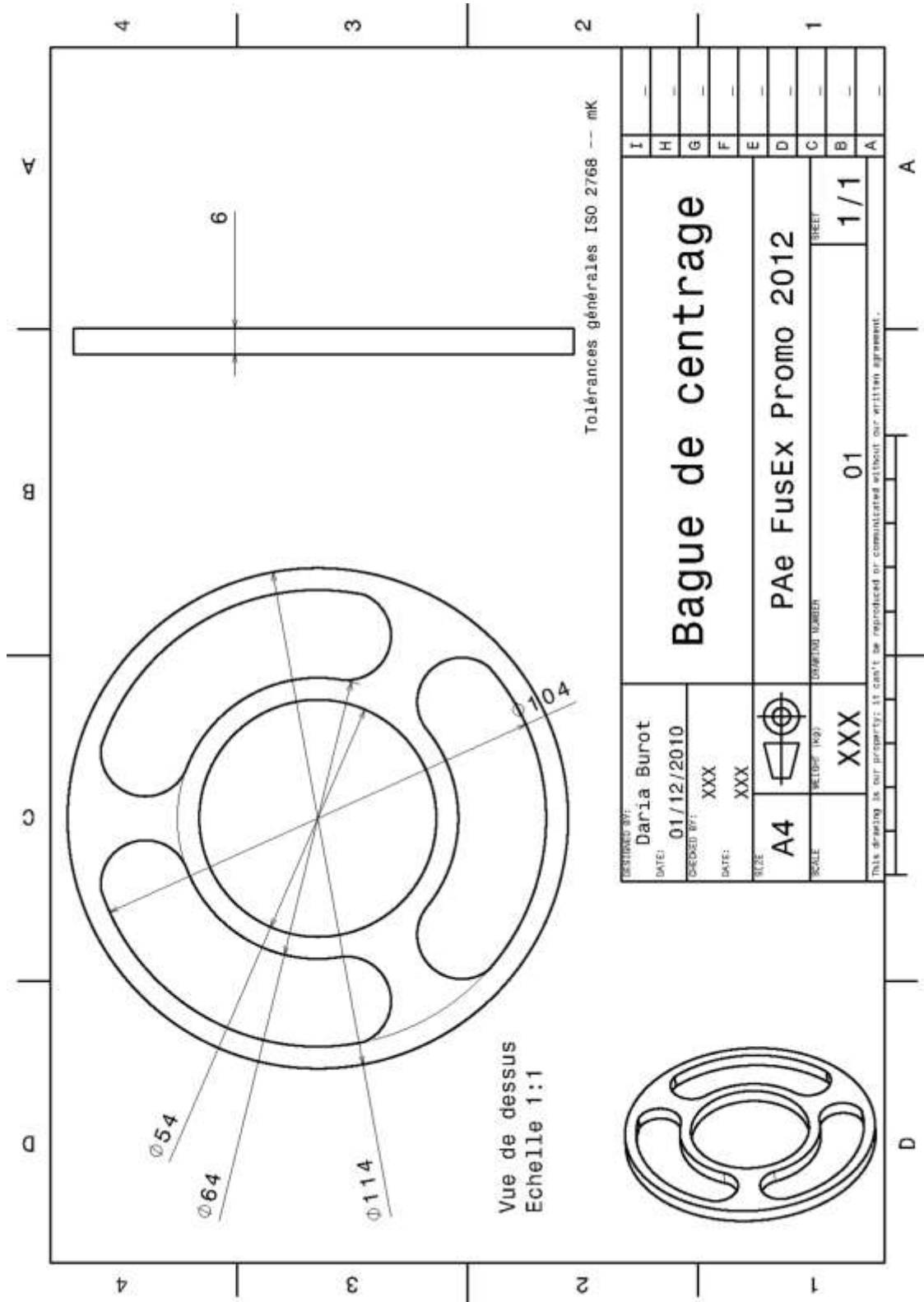
?				0%	
Existe-il un document de chronologie avant le vol ?	x			2,00%	0,00%
	Total :			13,00%	

Annexe 7 : Dessins de définition des pièces usinées à l'école

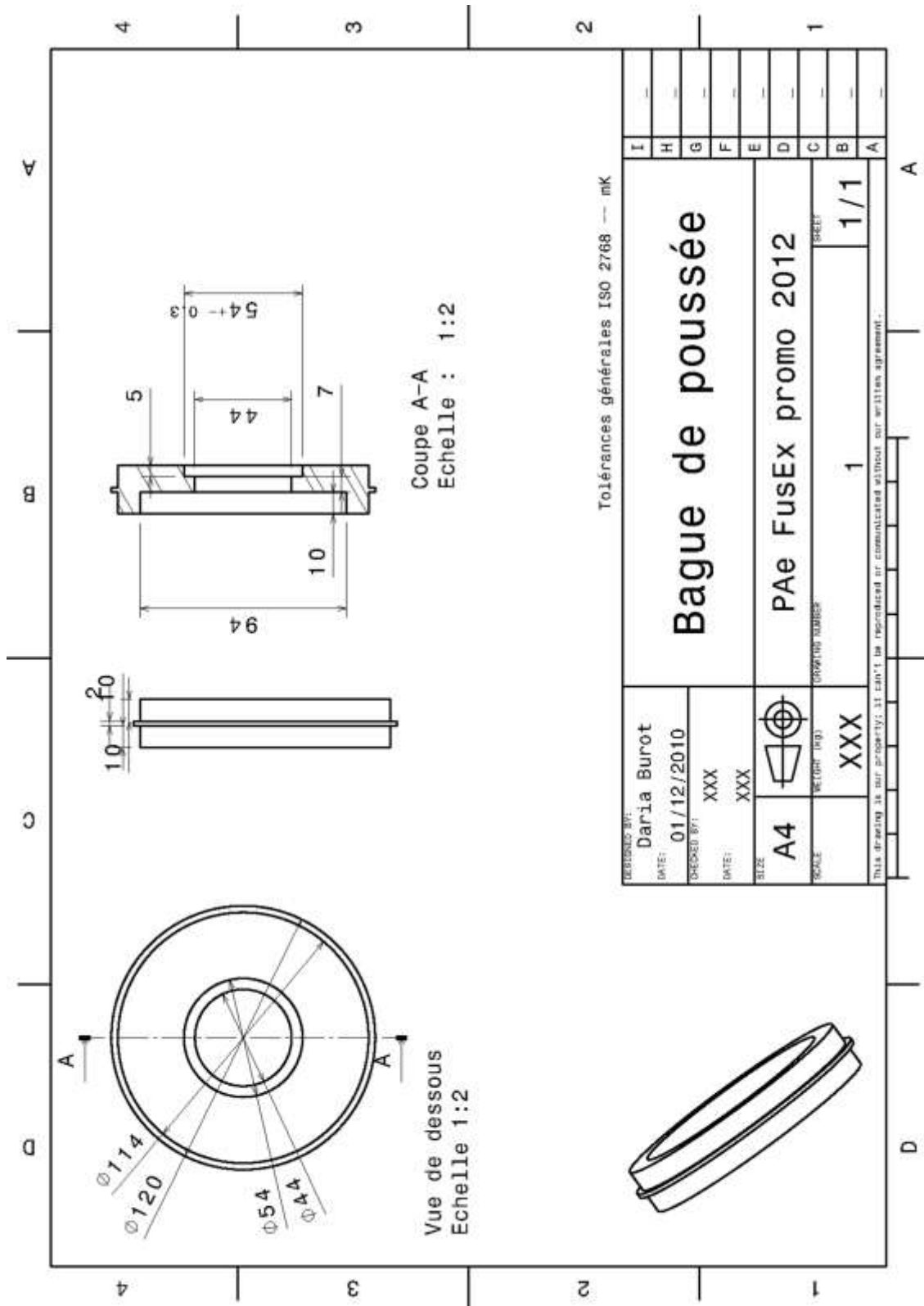
a. Case moteur



Dessin de définition de la bague de retenue

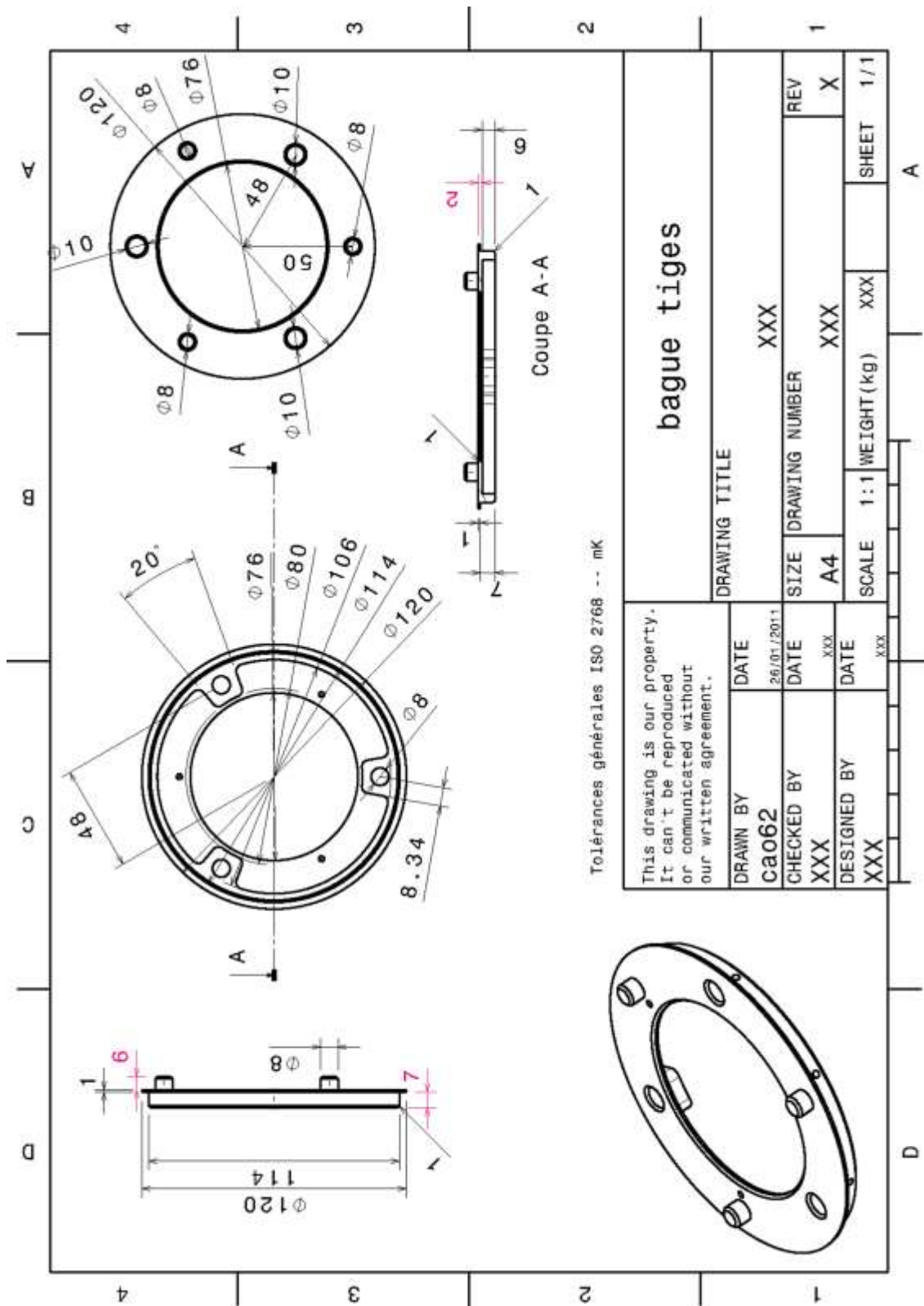


Dessin de définition de la bague de centrage

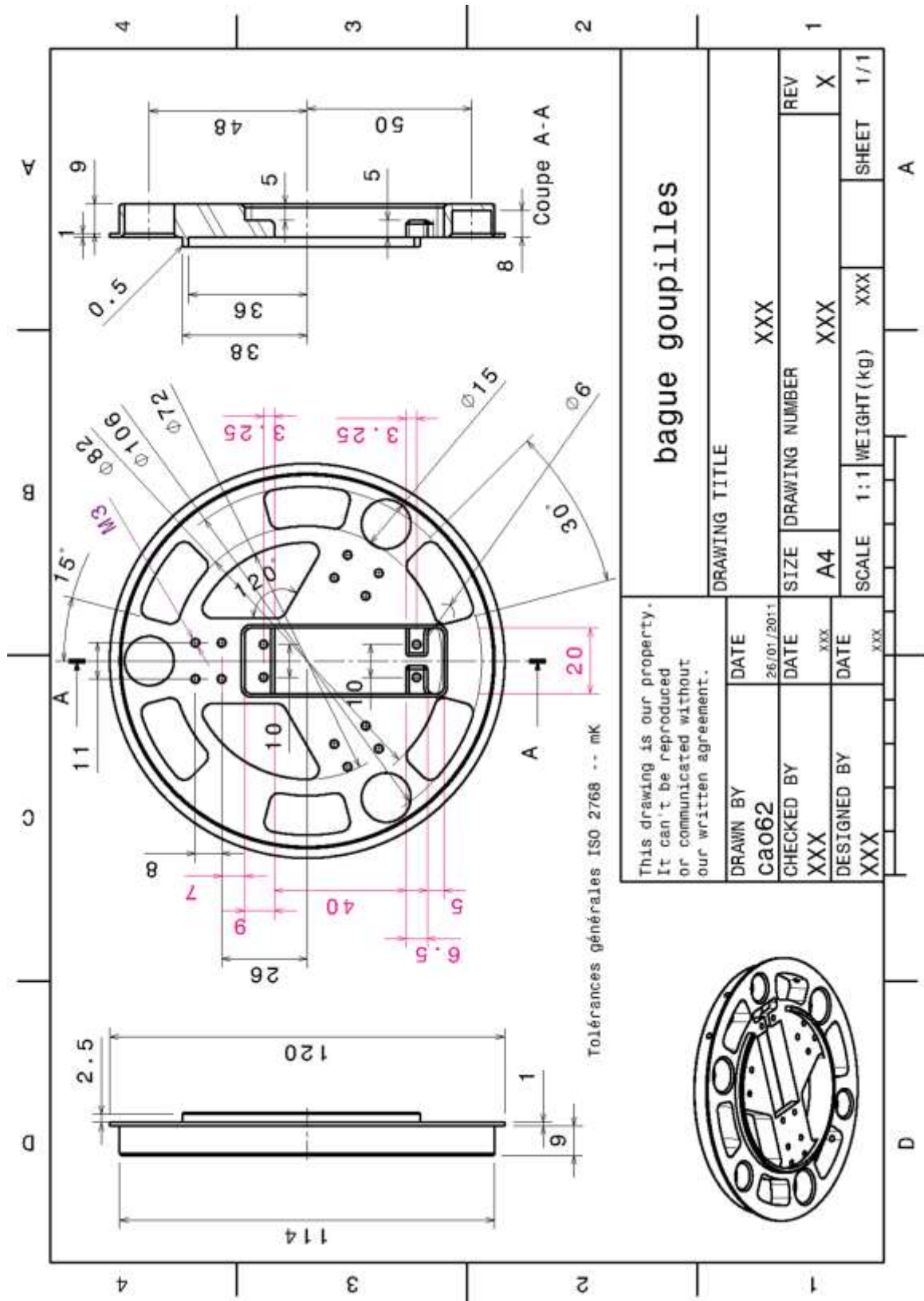


Dessin de définition de la bague de poussée

b. Module de séparation

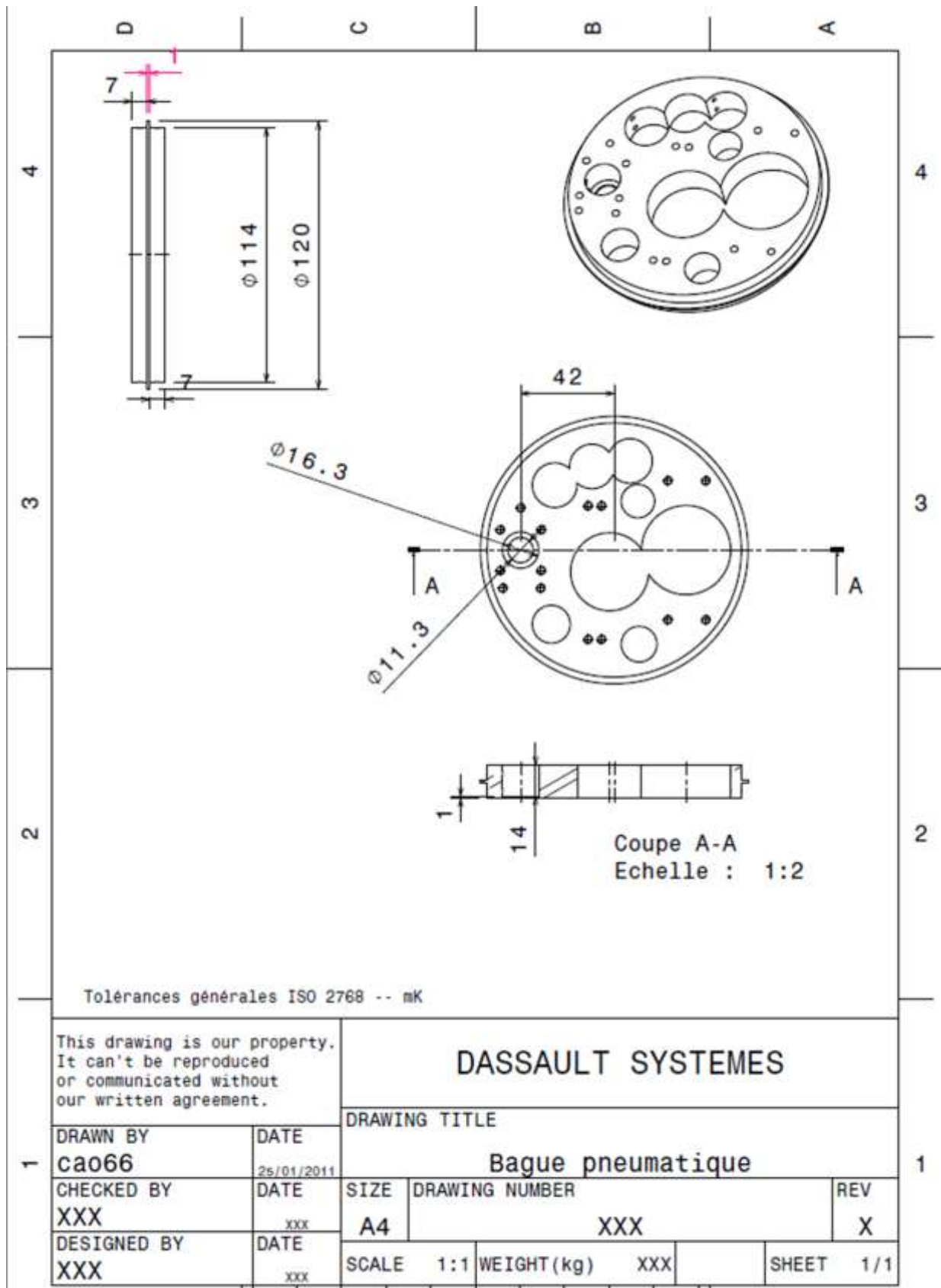


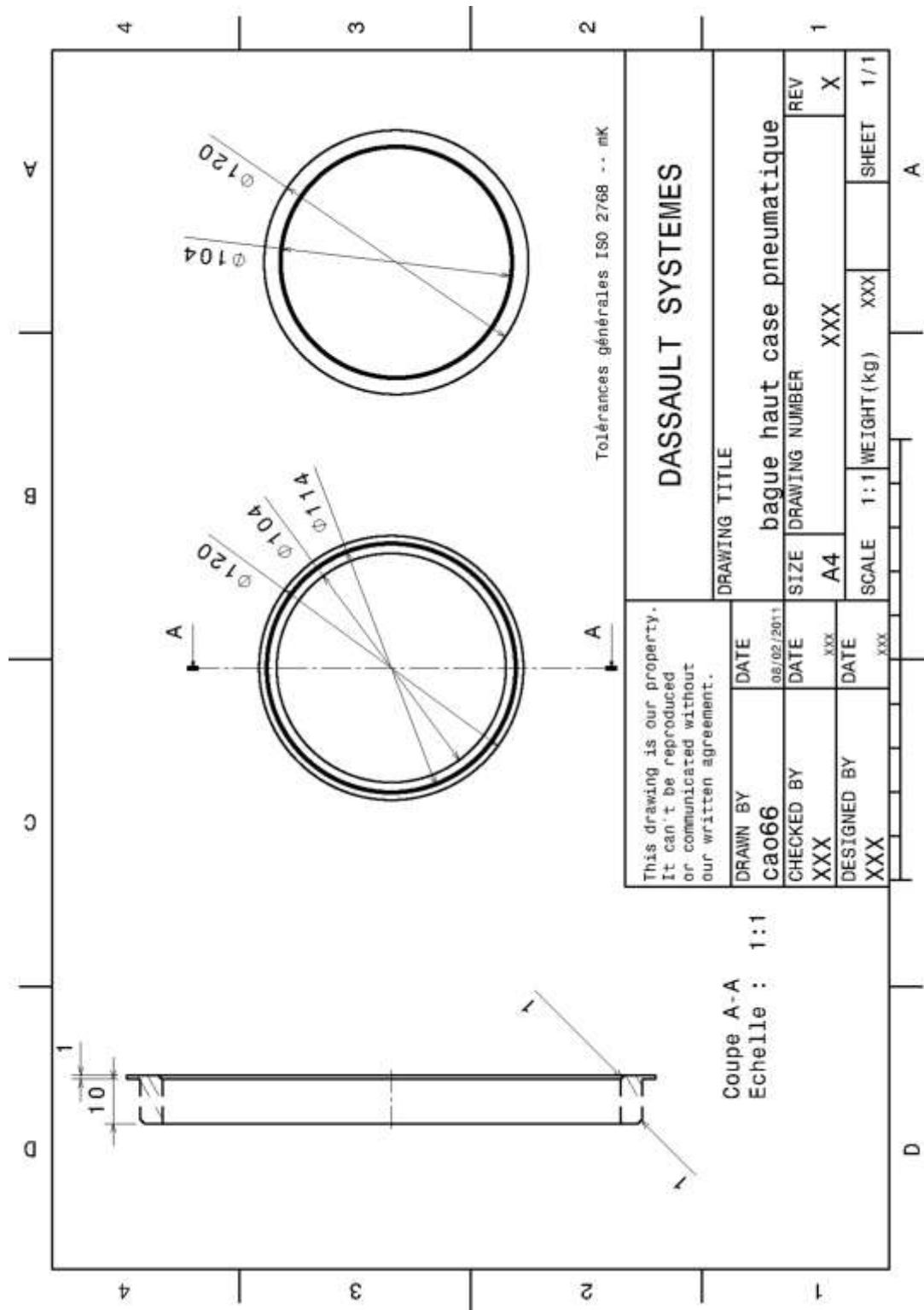
Dessin de définition de la bague inférieure du système de séparation



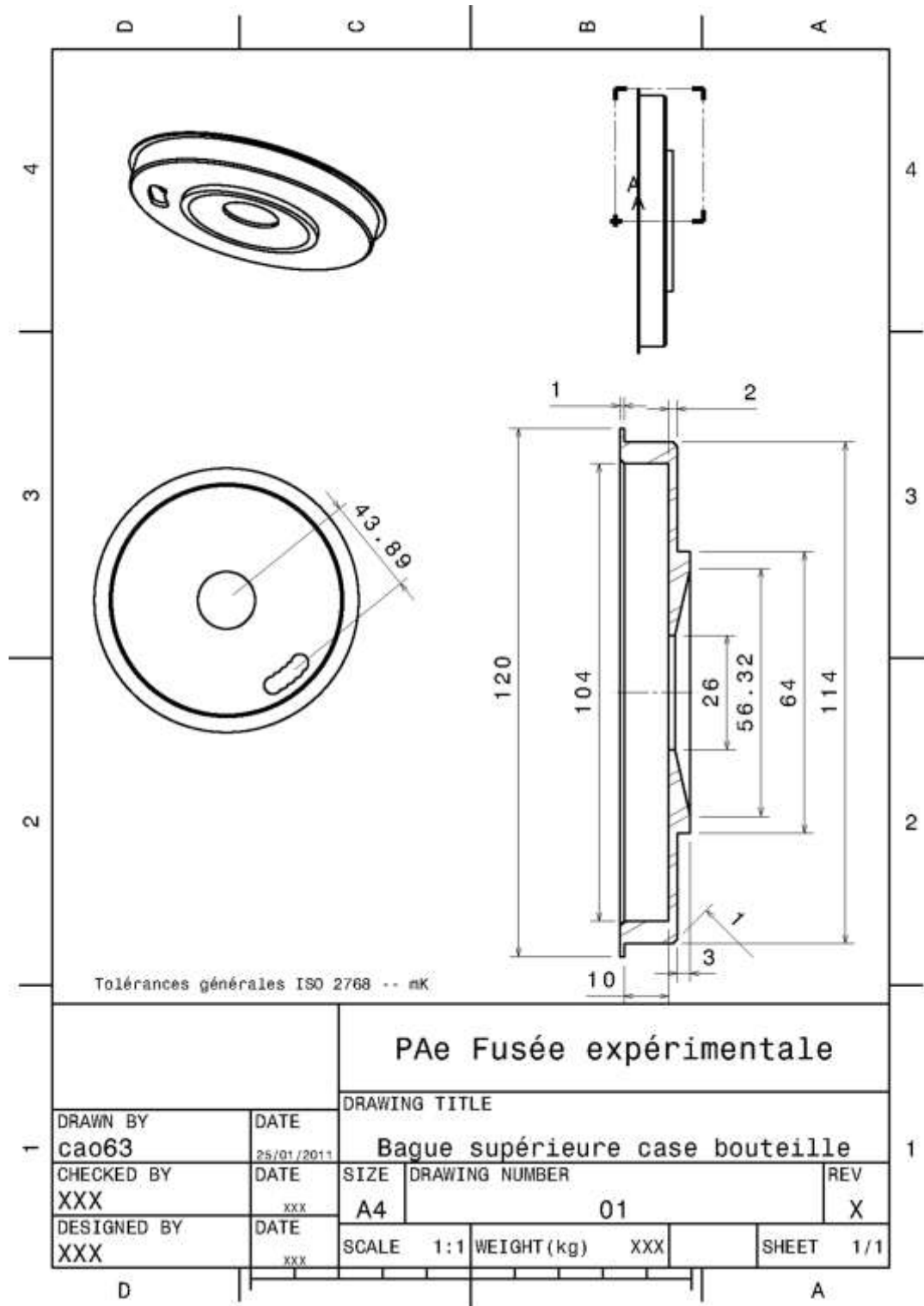
Dessin de définition de la bague supérieure du système de séparation

c. Système pneumatique

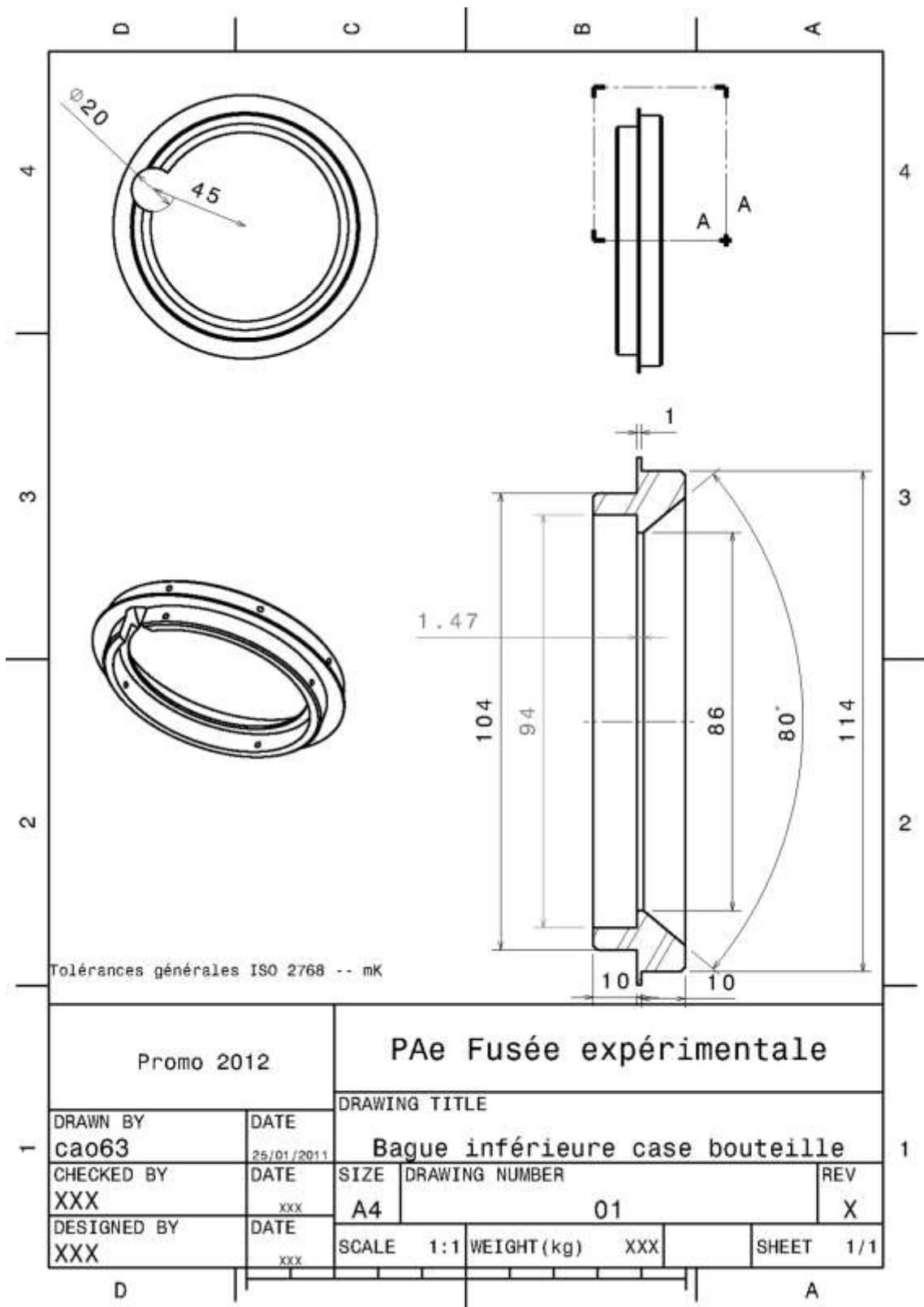




Dessin de définition de la bague supérieure de la case pneumatique

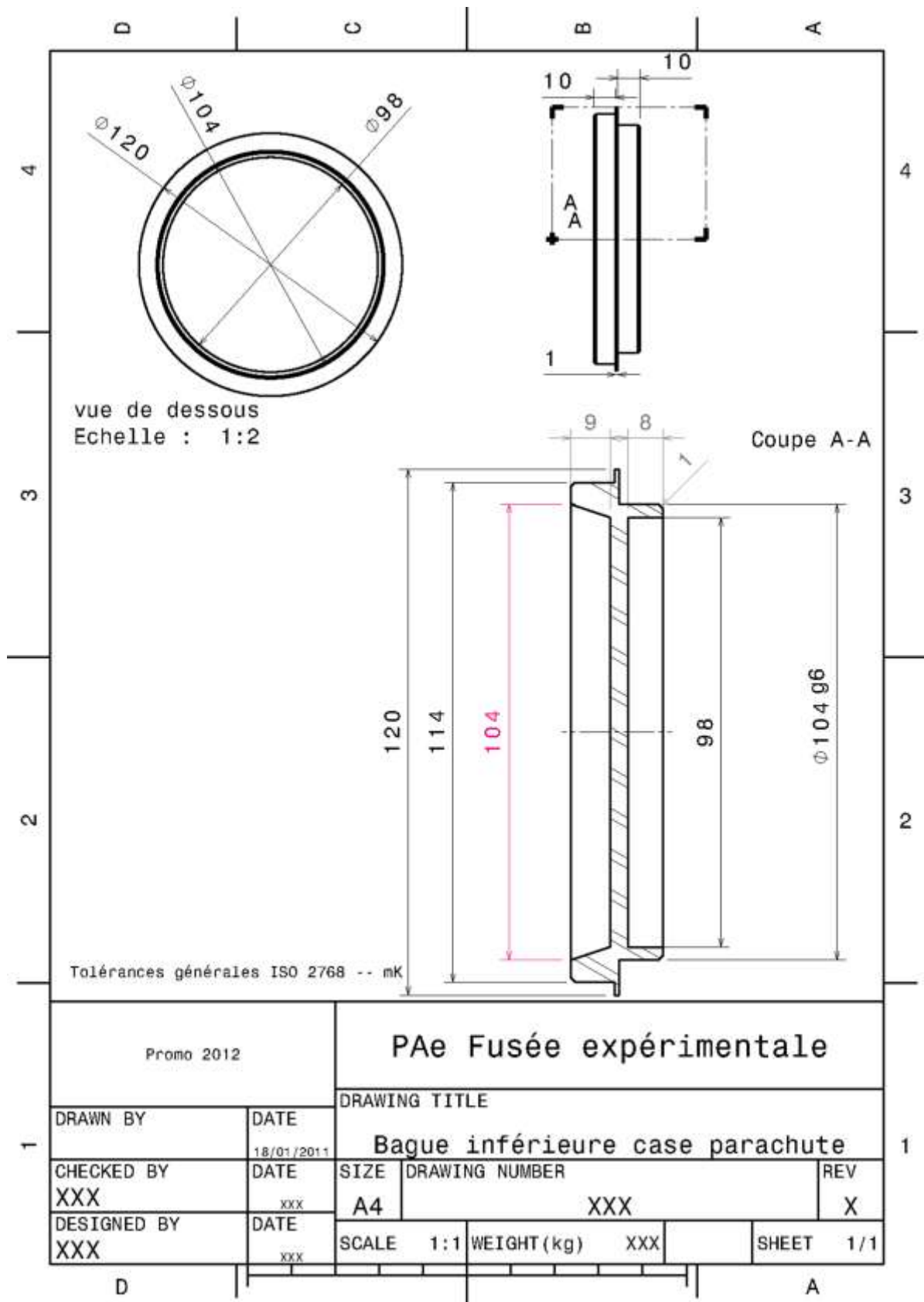


Dessin de définition de la bague inférieure de la case bouteille

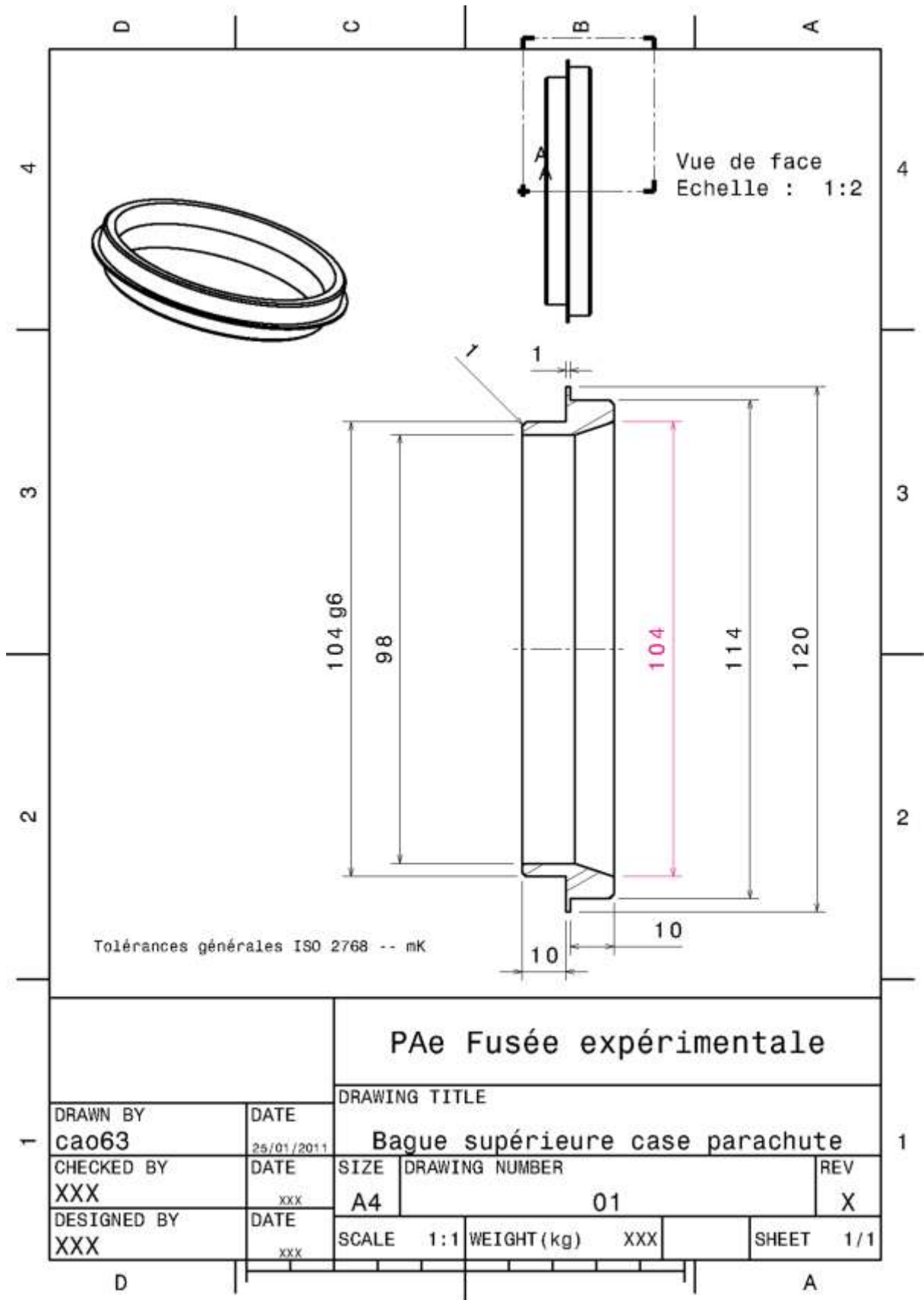


Dessin de définition de la bague supérieure de la case bouteille

d. Case parachute

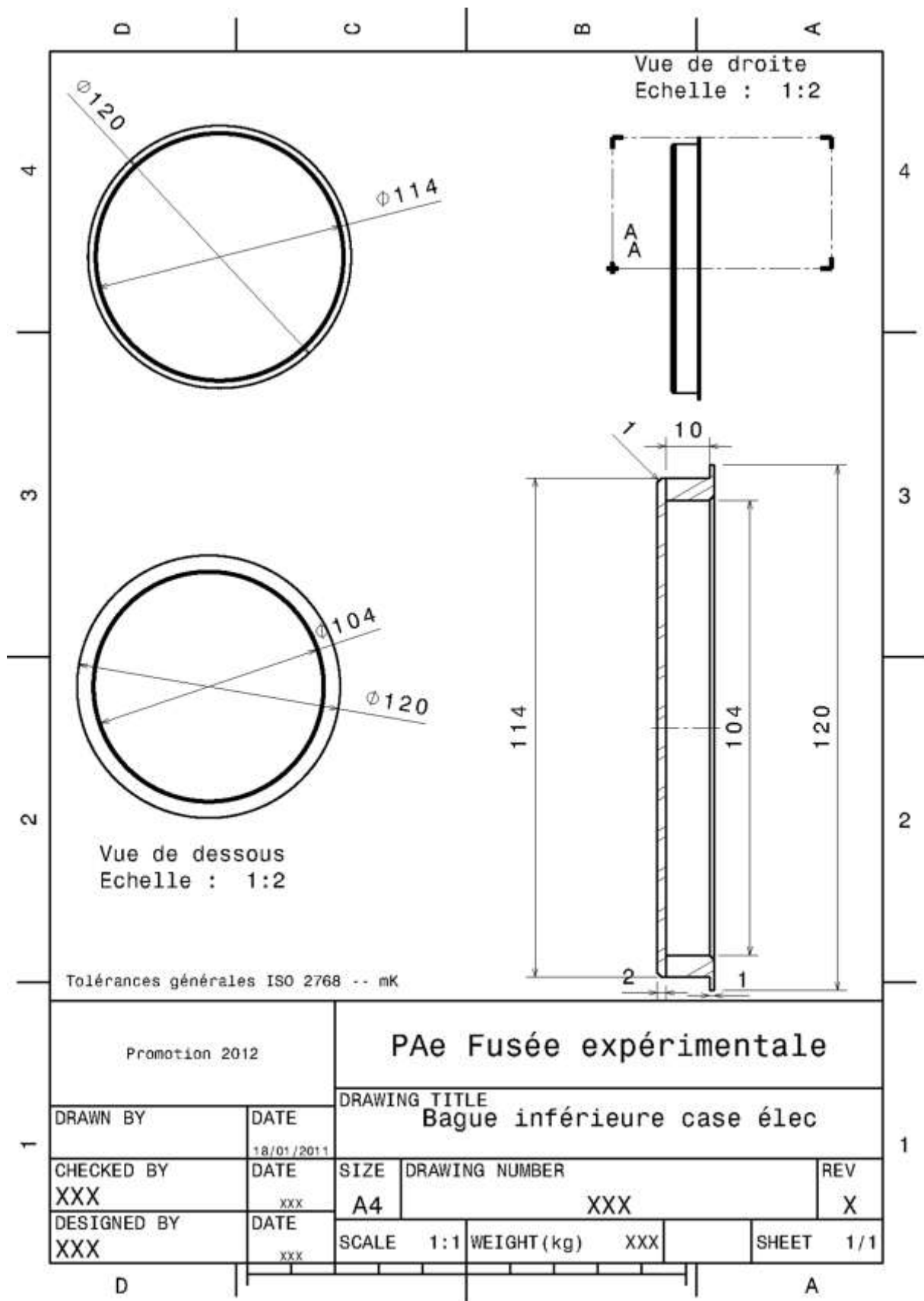


Dessin de définition de la bague inférieure de la case parachute



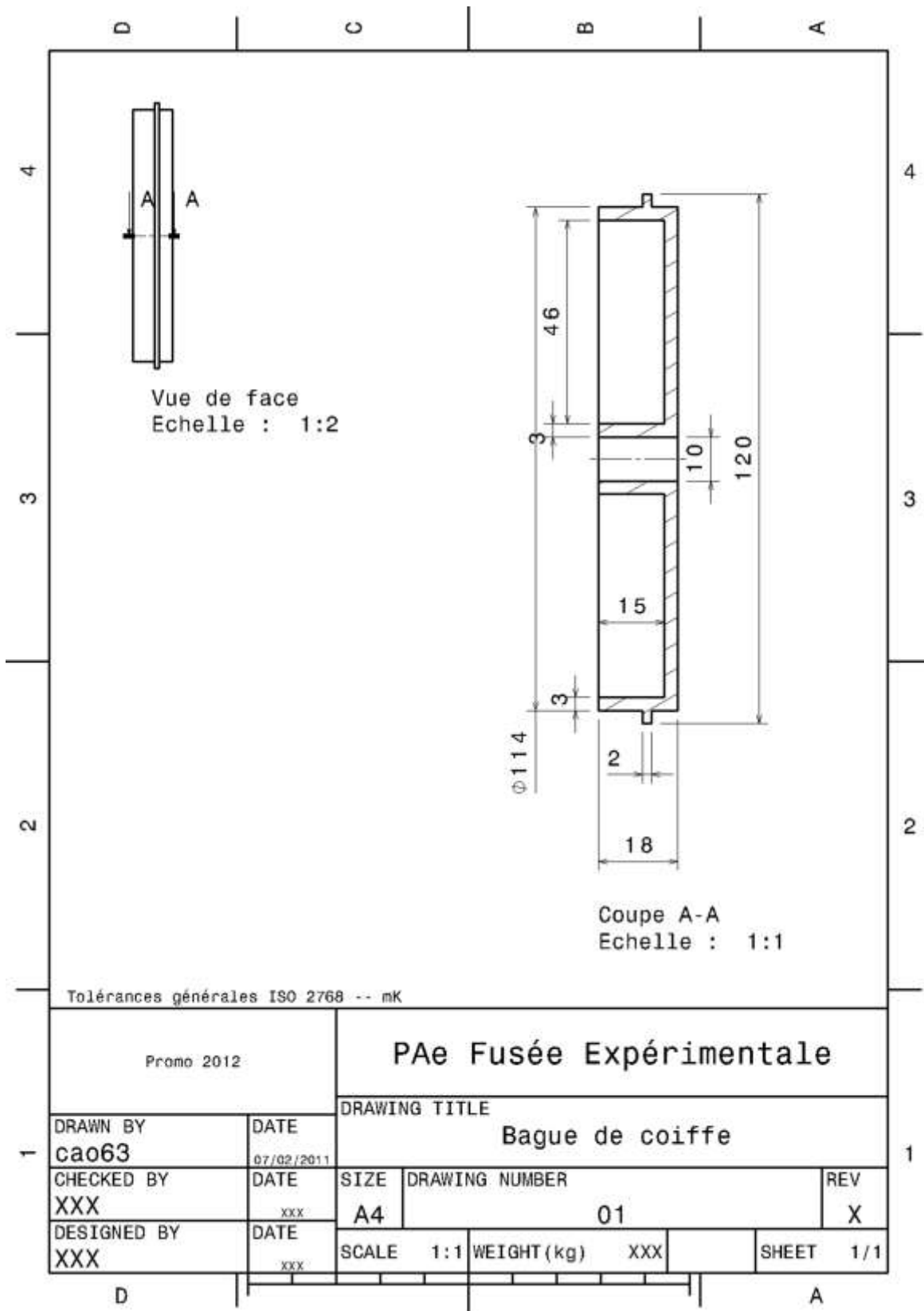
Dessin de définition de la bague supérieure de la case parachute

c. Case électronique

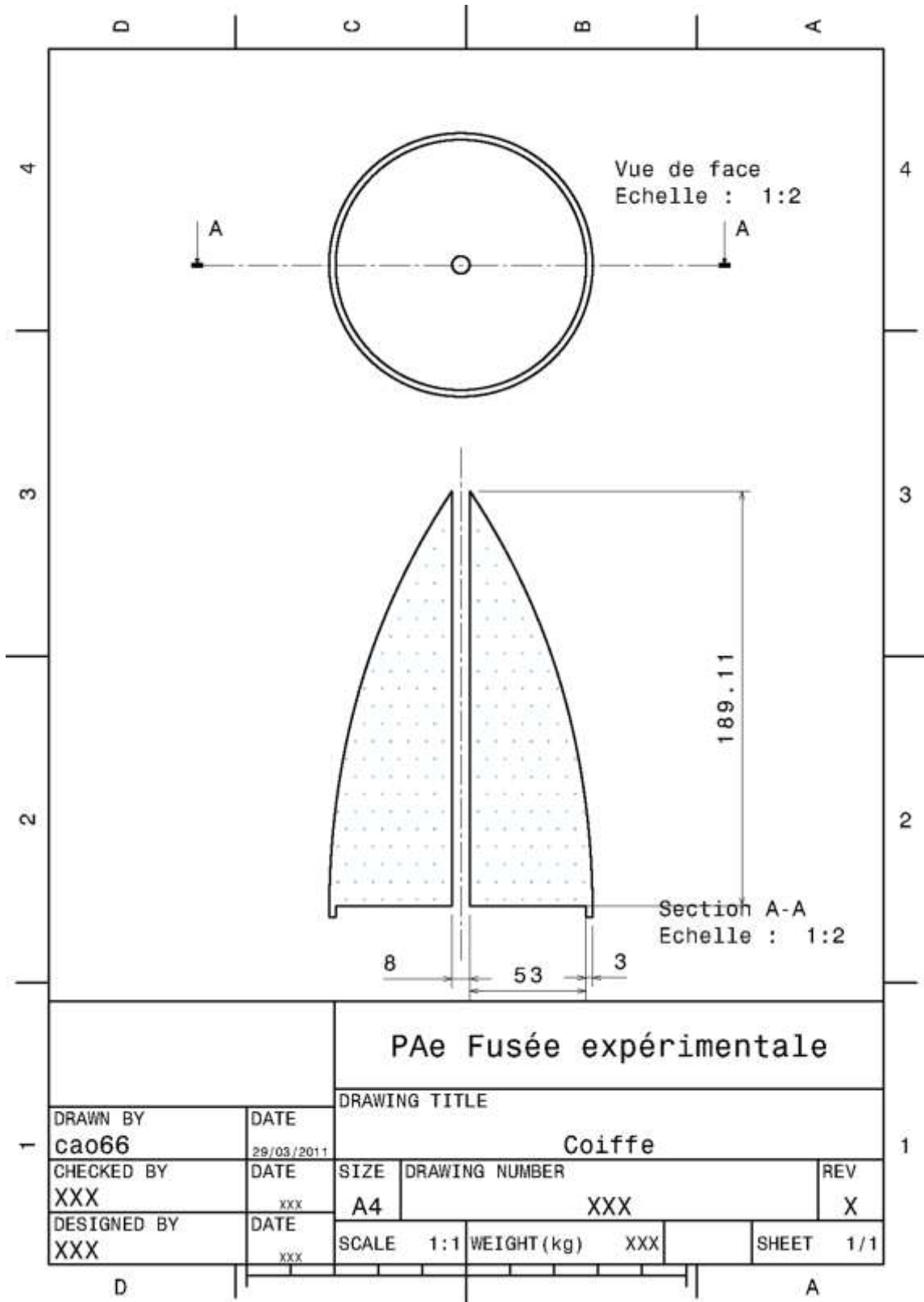


Dessin de définition de la bague inférieure de la case électronique

f. Coiffe



Dessin de définition de la bague de coiffe



Dessin de définition de la coiffe

Annexe 8 : Dimensionnement des ailerons



STABILITO

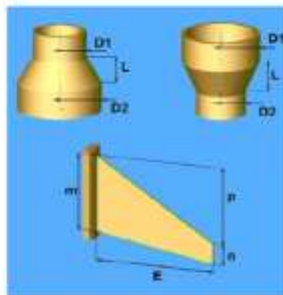
Language: Français

Fusée	
Nom	Zeppelin
Club	CLC
Type	Fusée expérimentale
Masse	7,08 kg sans propu
Centre de Masse	1000 mm avec propu vide
Longueur totale	2000 mm

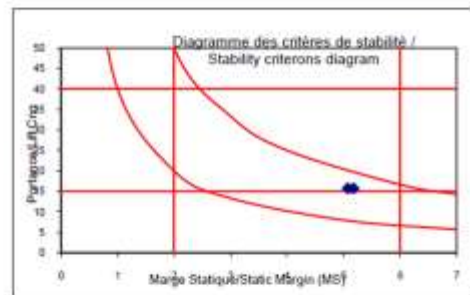
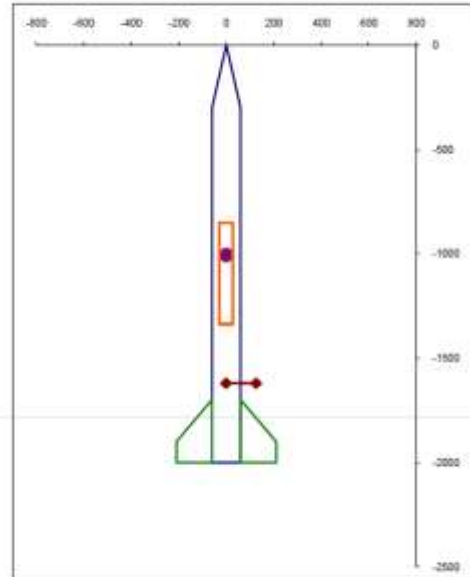
Ogive	
Hauteur	300 mm
Forme	Ogivale (pointue)
Diamètre	120 mm
Diamètre Réf.	120 mm

	JupeRétreint1	JupeRétreint2
L		
D1		
D2		
Implantation		

Ailerons	
m	300 mm
n	100 mm
p	200 mm
E	150 mm
Epaisseur	2 mm
Nombre	4
Implantation	1700 mm
Diamètre	120 mm



Stabilité des fusées à ailerons
Version 2.2 mono-empennage
Remplir les cases jaunes



Propulseur	
Type	8 : Pro54-5G (e)
Implantation	850 mm
Poussée	800 N
Impulsion totale	2060 N.s

Rampe	
Longueur	4 m
	82 m/s ²
	0,3 s

	Propu plein	Propu vide	Sans propu
Masse propu	1,68 kg	0,69 kg	-
CdM propu	250 mm	240 mm	-
Masse fusée	8,76 kg	7,77 kg	7,08 kg
CdM fusée	1012 mm	1000 mm	991 mm

	XCp	Cnα
Ailerons	1838 mm	13,7
Ogive	140 mm	2,0
JupeRétreint 1	0 mm	0,0
JupeRétreint 2	0 mm	0,0

Crîtères	Fusée expérimentale	
Décollage	20 m/s	-
Finesse	10	35
Cnα	15	40
MS	2 D	6 D
MS*Cnα	40	100

Résultats	27/03/2011		
Décollage	~25,5 m/s		OK
Apogée	~1328 m		
Culminat ²	~16 s		
Finesse	16,7		OK
Cnα	15,7		OK
XCp	1621 mm		
MS	5,08 D	5,18 D	OK
MS*Cnα	79,7	81,3	OK

Conclusion **STABLE**

Commentaire libre :

Annexe 9 : Dimensionnement des parachutes

- Vitesse souhaitée à l'arrivée au sol :

Le but du parachute est de ralentir la fusée avant l'atterrissage afin de la récupérer en bon état. On considère en général qu'une bonne vitesse au sol est inférieure à 15 m/s. Toutefois, le cahier des charges de Planète Sciences impose une autre condition : afin que les conditions météorologiques n'influent pas sur le lieu d'atterrissage, il faut que la vitesse au sol soit suffisamment importante pour que la fusée ne soit pas emportée par le vent. On doit donc prévoir une vitesse à l'atterrissage supérieure à 8 m/s. Habituellement, on prévoit pour cette vitesse une valeur de l'ordre de 10 m/s.

- Surface du parachute

Planète Sciences a mis à notre disposition une notice technique permettant de dimensionner le parachute correctement par rapport à la masse de la fusée. Pour cela, il est nécessaire de connaître la masse M de la fusée avec un propulseur vide, sa vitesse au sol théorique V_d , et la masse volumique ρ de l'air à l'altitude où le parachute sera ouvert. On en déduit la surface nécessaire du parachute via la formule :

$$S = \frac{2Mg}{\rho C_x V_d^2}$$

Où g est l'accélération de la pesanteur et C_x le coefficient aérodynamique du parachute, fixé à 1 ici comme pour une surface plane.

- Nombre de suspentes

Les suspentes doivent résister au choc subi à l'ouverture. Pour cela, il faut calculer la force maximale exercée par la fusée sur le parachute ouvert. L'expression de cette force est donnée dans la notice :

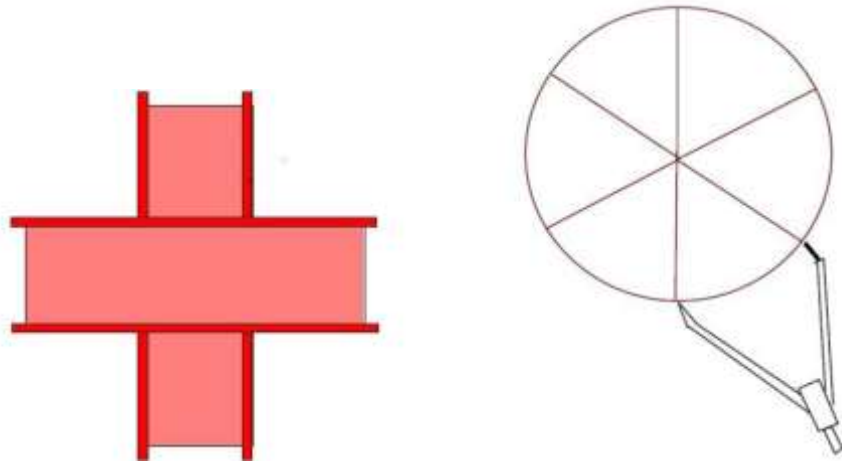
$$F = \frac{\rho S C_x V_0^2}{2}$$

Où V_0 est la vitesse de la fusée à l'ouverture du parachute. On prend généralement cette vitesse comme étant égale à 50 m/s.

Pour déterminer la force exercée sur chaque suspente, on a utilisé les résultats de la fusée Léviathan réalisée par la promotion 2011. Connaissant la masse de la fusée, les dimensions du parachute et en considérant que seul 75% des suspentes étaient sollicitées à l'ouverture (car leurs longueurs sont différentes), on calcule la force supportée par chaque suspente qui est de 467,2 Newtons. On en déduit alors le nombre de suspentes nécessaires au minimum.

- Forme du parachute

Il existe deux formes possibles de parachute, cruciformes ou hémisphériques (figure xx).



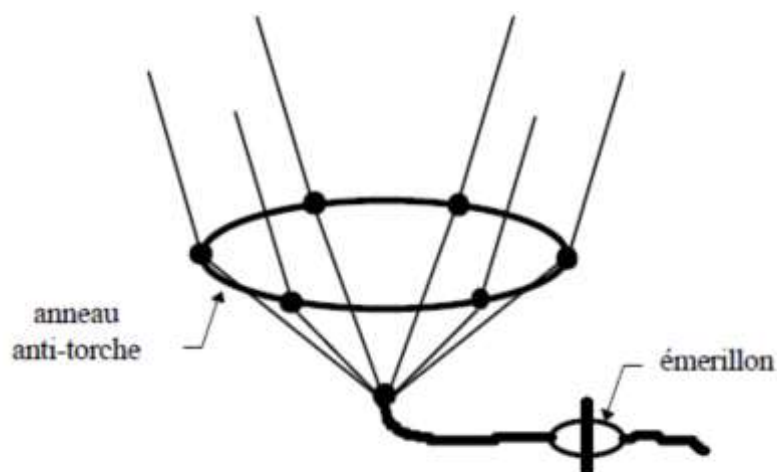
Parachute cruciforme (à gauche) et hémisphérique (à droite)

Le parachute cruciforme permet des ouvertures à grande vitesse et adapte sa forme à la vitesse de descente de la fusée. Le parachute hémisphérique, permet lui d'obtenir une vitesse de descente faible.

Dans notre cas, nous souhaitons que le parachute soit capable de résister à l'effort important exercé lors du déploiement. De plus, le cahier des charges de Planète Sciences nous oblige à réduire considérablement la vitesse de la fusée. **Un parachute de type hémisphérique serait donc la meilleure solution pour garantir une descente sécurisée de notre fusée.**

- Émerillon et anneau anti-torche

L'émerillon est placé entre les suspentes et la corde qui attache le parachute à la fusée. Il empêche le parachute de s'enrouler autour des suspentes et de se refermer.



Anneau anti-torche

L'anneau anti-torche est quant à lui placé sur les suspentes, vers leur extrémité basse (figure xx). Il permet de garder les suspentes bien séparées à l'ouverture du parachute, évitant ainsi qu'elles ne s'emmêlent (on dit alors que le parachute part en torche).

- Application de la méthode pour les deux parachutes de Zeppelin
 - ✓ Parachute case moteur

Pour cette partie de la fusée, nous avons suivi les recommandations habituelles de Planètes Sciences, avec une vitesse à l'arrivée au sol de l'ordre de 10 m/s. On a obtenu qu'il nous faut un parachute de surface 0,58 m². La force exercée alors par la case sur le parachute est de 870 N. Il nous faut donc au minimum deux suspentes.

- ✓ Parachute partie supérieure

Afin de permettre au ballon de se gonfler correctement, nous avons demandé une dérogation à Planète Sciences afin de pouvoir autoriser notre fusée à arriver au sol avec une vitesse de 5 m/s au lieu des 10 habituels. Cette dérogation nous a été accordée. Nous obtenons alors un parachute de surface 3,69 m². La force exercée sur le parachute est alors de 5535 N, il nous faut donc ici au moins 11 suspentes.

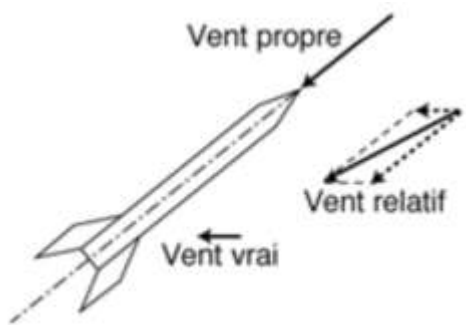
Annexe 10 : Le vol d'une fusée, trajectoire, stabilité

La fusée est soumise à plusieurs forces au cours du vol dont la poussée du moteur, le poids, et la résistance de l'air.

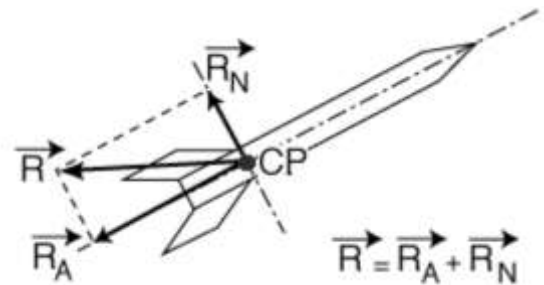
Cette résistance provient d'une action combinée :

- de l'air fixe par rapport à la fusée en déplacement : le **vent propre**. La vitesse de ce vent est égale à la vitesse de déplacement de la fusée.
- de l'air en déplacement pour des raisons météorologiques : le **vent vrai**. Les vitesses de ces deux vents s'additionnent pour ne donner qu'un seul déplacement d'air apparent, le **vent relatif ou apparent**.

La résistance de l'air à l'avancement de la fusée, qui s'applique en un point appelé «**centre de poussée aérodynamique**» (C.P.). La distance entre le centre de gravité de la fusée et le centre de poussée aérodynamique est appelé **marge statique**.

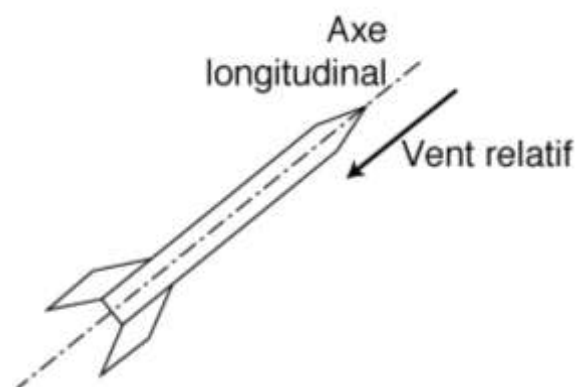


Décomposition du vent



Position du centre de poussée et action du vent relatif

Lorsque cet alignement est rompu, la fusée est dite en incidence. L'angle que fait alors l'axe longitudinal de la fusée avec le vent relatif est l'**angle d'incidence**.



Dynamique du vol idéal

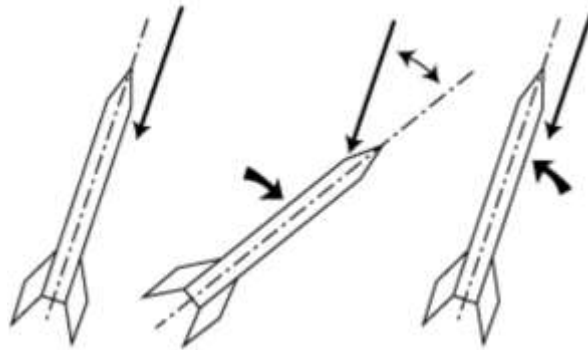
Lorsque cet alignement est rompu, la fusée est dite en incidence. L'angle que fait alors l'axe longitudinal de la fusée avec le vent relatif est l'**angle d'incidence**.

En d'autres termes, si, pour une quelconque cause, la fusée se met en incidence, elle retrouvera sa position initiale (axe longitudinal aligné avec le vent relatif) si elle est stable.

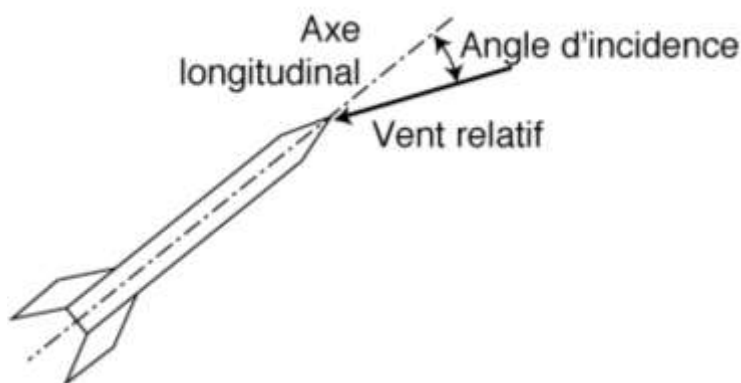
Conditions de stabilité :

De manière expérimentale, il est possible d'arrêter des conditions moyennes de stabilité :

- La marge statique doit être comprise entre 1 et 3 calibres (le calibre vaut un diamètre de fusée).
- Chaque aileron doit avoir une envergure comprise entre 1 et 2 calibres, une hauteur comprise entre 1 et 3 calibres, le nombre minimal d'ailerons étant de trois.

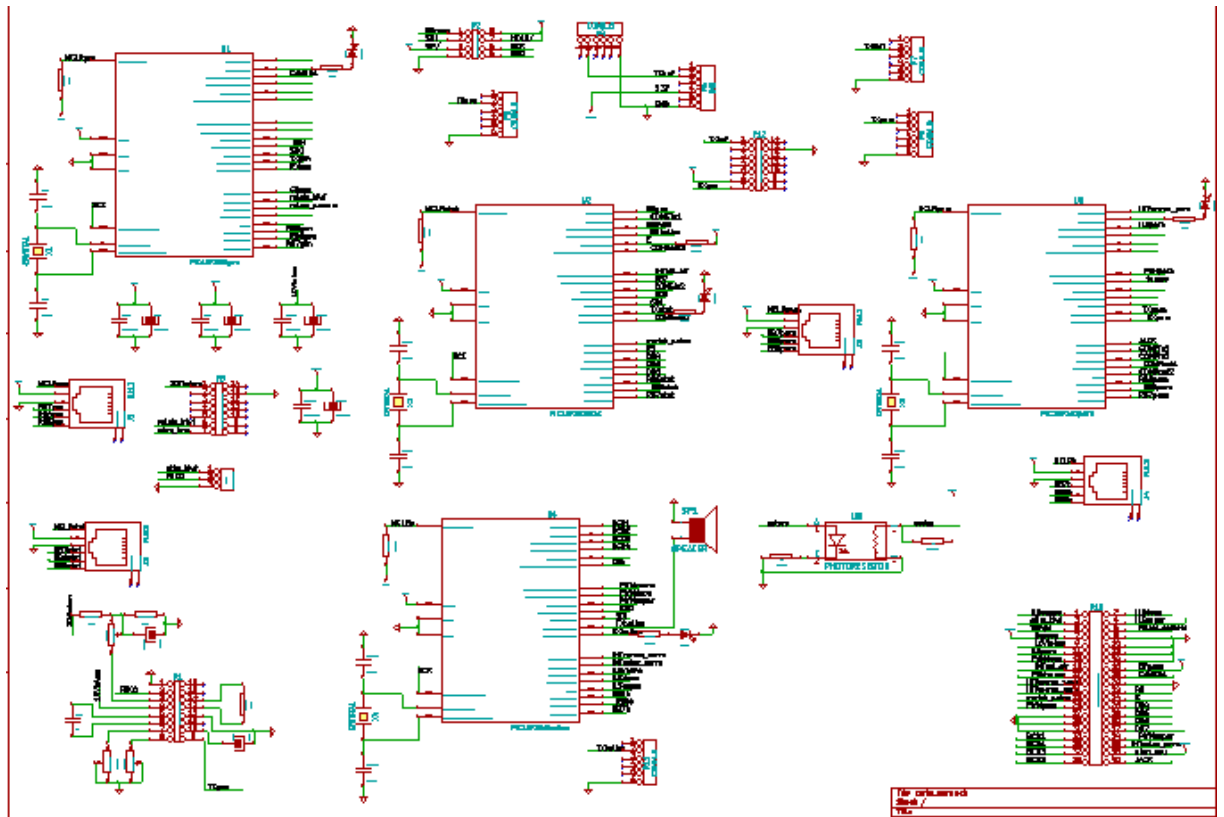


Oscillation d'une fusée stable

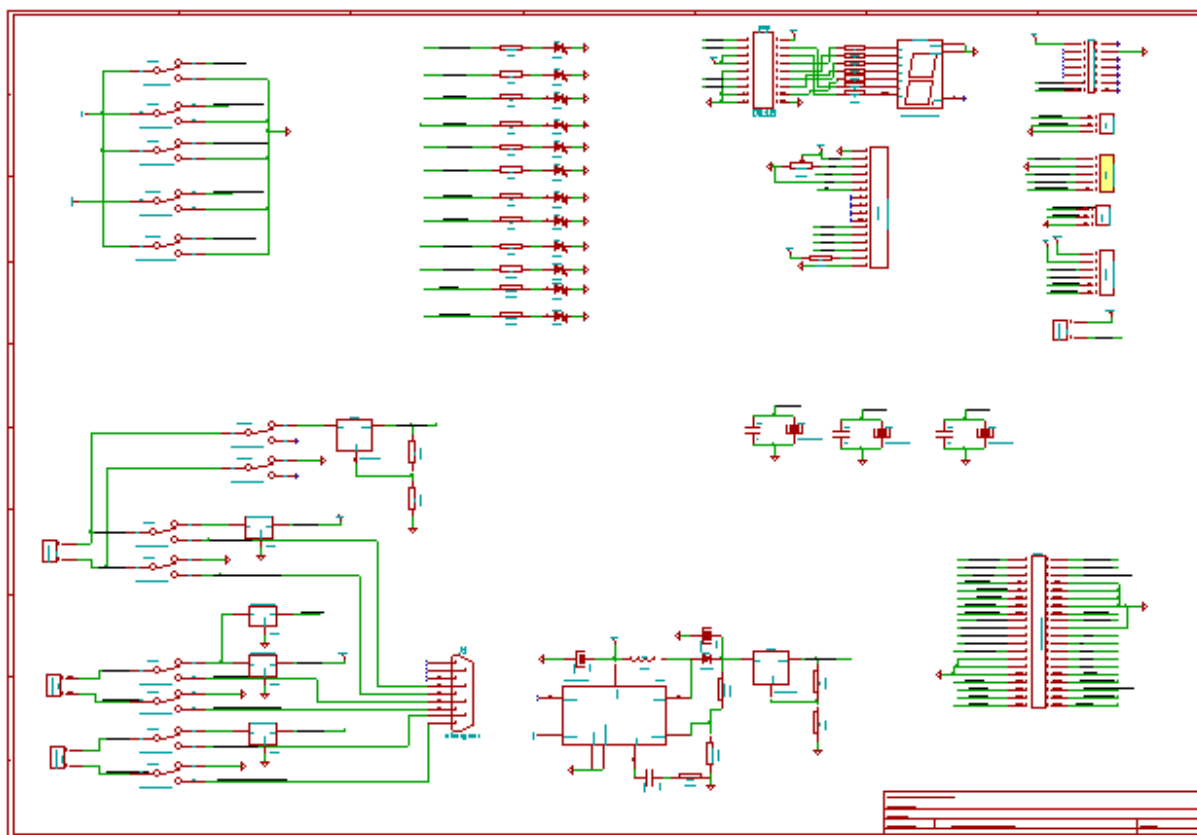


Dynamique d'un vol réel

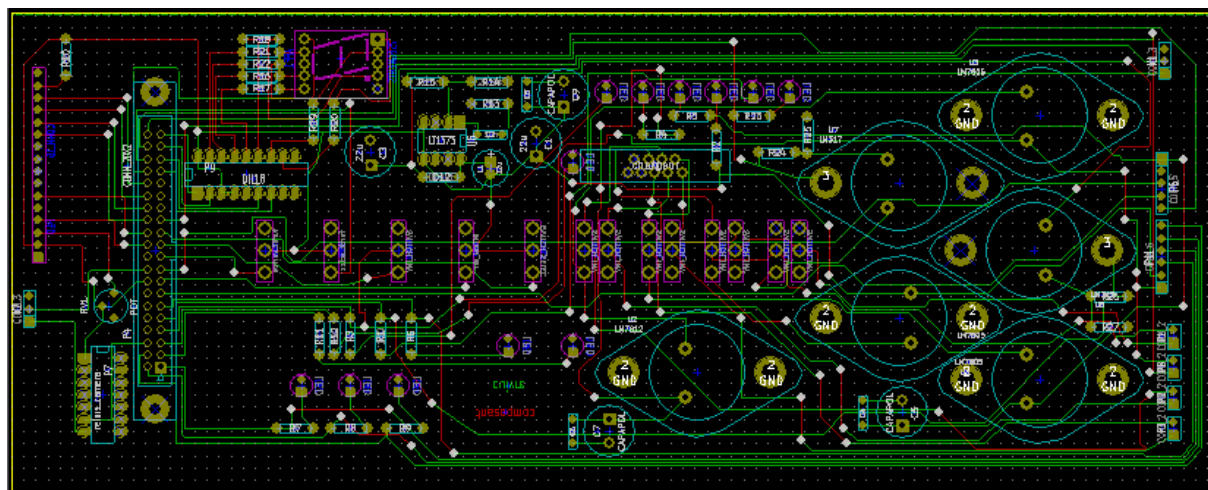
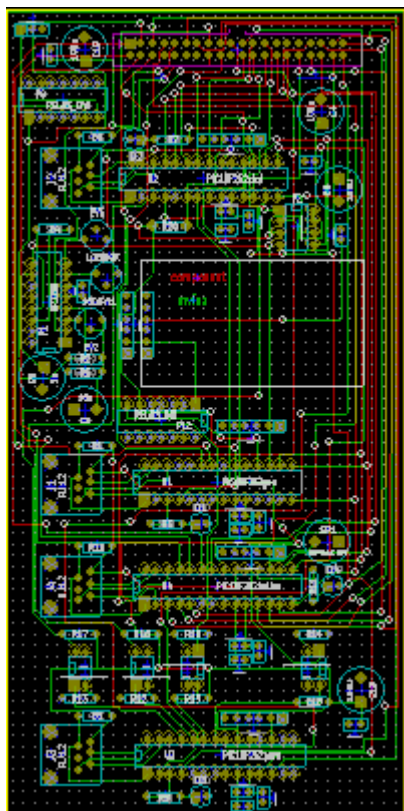
Annexe 11 : Schématique de la carte mère



Annexe 12 : Schématique de la carte d'alimentation



Annexe 13 : Typons des cartes électroniques



Annexe 14 : Dossier de sécurité

Préambule

Notre fusée expérimentale comportant un système pneumatique haute pression, Planète Sciences et le CNES, en particulier les personnes qui seront amenées à évoluer autour de la fusée (contrôleurs, pyrotechniciens), demandent la construction d'un dossier de sécurité. Pour des raisons de sécurité et d'assurance, il faut en effet démontrer que des mesures ont été prises pour minimiser les risques d'accident.

Le présent dossier listera point par point les éléments du système et informera le lecteur sur leur utilité, leur fonctionnement et sur les démarches mises en œuvres pour respecter le cahier des charges (dont une partie reprend les points du cahier des charges Fusex), comme par exemple les certifications haute pression ou la prise en compte de coefficients de sécurité généreux.

On trouvera à la fin du dossier, en annexe, différents documents, notamment les certificats de sécurité des éléments pneumatiques utilisés.

Enfin, nous avons rédigé ce dossier de sécurité en nous appuyant sur celui de la fusée Iness, projet du club de l'INSA de Lyon (CLES-FACIL). En effet celui-ci avait été fort apprécié à l'époque, et s'en servir de support nous a été conseillé par Planète Sciences.

I. Descriptif du système

Le système pneumatique de Zeppelin a pour but de gonfler un ballon à l'hélium pendant le vol et de séparer ce ballon du reste de la fusée. Il est composé essentiellement :

- d'un réservoir d'hélium haute pression (200bars)
- d'un système de détente (200bars à 50bars)
- de tuyauterie pour acheminer l'air jusqu'au ballon
- de vannes, manuelles ou commandées
- d'un système de déconnexion pour que le ballon puisse se séparer du reste de la fusée
- d'un système de remplissage du réservoir avec une bouteille tampon

Le fonctionnement détaillé du système est décrit dans le document pdf descriptif de l'expérience, et ne sera pas représenté ici, où nous nous concentrerons sur l'aspect sécurité.

Tous les éléments vont être décrits par la suite. Nous distinguerons une partie haute pression et une partie basse pression, car celles-ci ne répondent pas aux mêmes exigences.

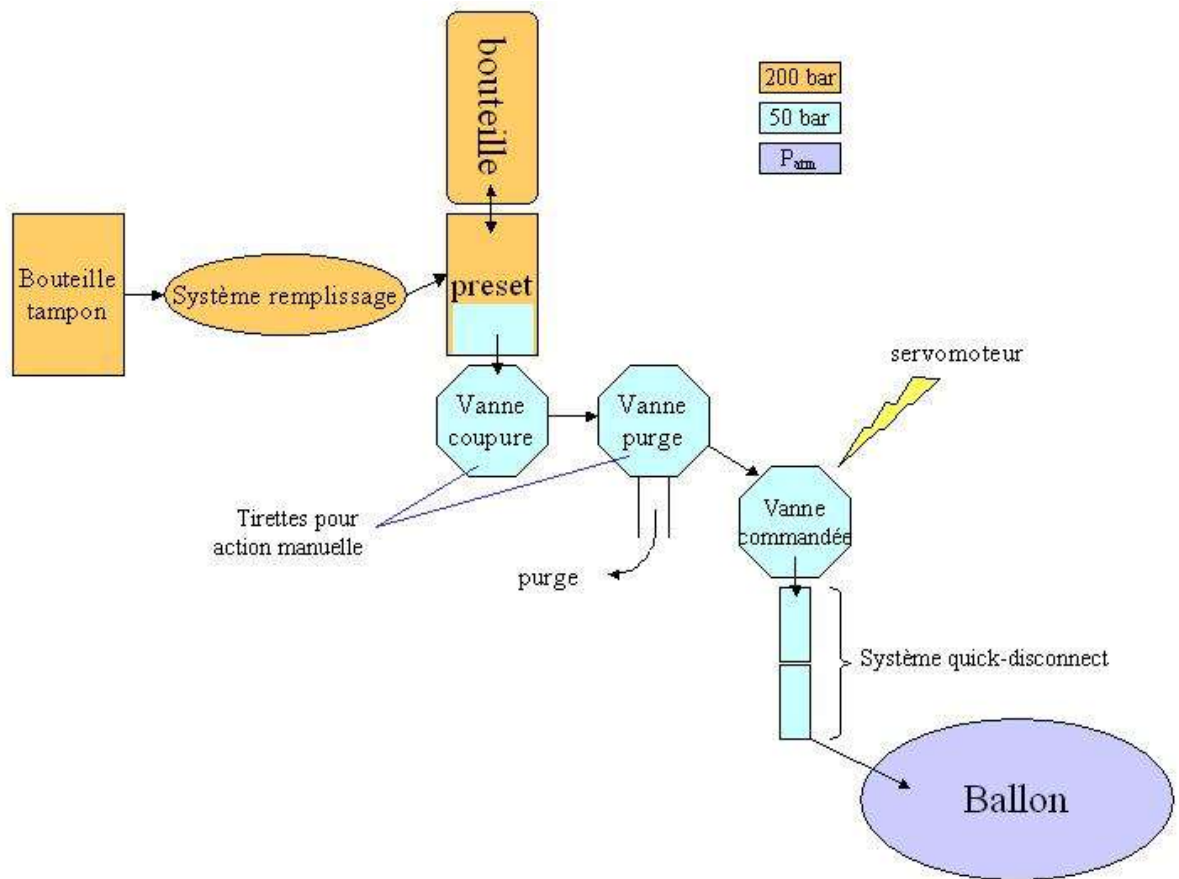


Figure 67: Schéma descriptif de l'ensemble du système

II. Cahier des charges fusées expérimentales Planète Sciences

Voici les règles du cahier des charges tel qu'il nous est fourni par Planète Sciences qui concernent les systèmes pneumatiques. Pour chaque règle nous expliquerons les mesures mises en place pour la respecter.

SECU 9 : Les gaz comprimés utilisés comme source d'énergie ou comme vecteur d'énergie doivent être ininflammables.

Le gaz que nous utilisons est de l'hélium, gaz rare, ininflammable et particulièrement inerte (moins dangereux que de l'air comprimé par exemple).

SECU10 : Les réservoirs de gaz comprimés doivent être équipés d'une purge permettant de les vidanger indépendamment du fonctionnement du système qu'ils alimentent.

Une vanne de purge manuelle est connectée directement après la bouteille, et permet une purge rapide du réservoir d'hélium quel que soit l'état du système aval. Notre système disposera en outre d'une autre vanne manuelle permettant l'isolement du système basse pression en

sortie de détenteur. La vanne de purge permettra la vidange du système en rampe en cas de problème lors des opérations des pyrotechniciens, et surtout nous assurera de pouvoir ramener la fusée en toute sécurité après son atterrissage, même si le système a subi un dysfonctionnement et que la bouteille est encore remplie.

SECU11 : $CS \geq 2$ où CS est le coefficient de sécurité (rapport entre la valeur maximale que peut supporter un équipement et la valeur normale).

Le matériel utilisé est du matériel standard haute pression, chaque élément disposant d'une certification, et les coefficients de sécurité des éléments sont systématiquement supérieurs à 2. Se reporter aux certificats de sécurité en annexe pour plus de précisions.

SECU12 : Le matériel au sol de remplissage des réservoirs de gaz comprimés doit être équipé au minimum soit d'une mesure de pression permettant de contrôler la pression de gonflage, soit d'une valve de sécurité, tarée au plus à 1,5 fois la pression de fonctionnement. A l'exception d'une conception telle que la pression maximale produite soit toujours inférieure à 1,5 fois la pression de fonctionnement.

La bouteille tampon d'hélium utilisée pour remplir la bouteille embarquée est à une pression de 200bars. Le système de remplissage du réservoir embarqué dispose d'un manomètre et d'une valve de sécurité. De plus il est prévu pour fonctionner à une pression nominale de 300bars, ce qui rajoute une marge de sécurité. Le réservoir embarqué dispose également d'un manomètre afin que chacun puisse vérifier l'état du réservoir à tout moment.

SECU13 : Les systèmes pneumatiques doivent avoir une autonomie de 2 heures minimum. La mise en pression ou en dépression ne peut se faire sur rampe pour des raisons de temps.

Nous avons testé notre système pneumatique pour s'assurer de son autonomie. Principalement nous avons mis en évidence l'absence de fuites en laissant pendant plusieurs heures le système sous pression. Ce test était particulièrement important en raison de l'utilisation d'hélium, gaz dont les molécules sont plus petites que pour l'air par exemple et qui s'échappe plus facilement de son contenant.

Pour ce qui est de la mise en pression, elle se fera au choix au R3, en tente club ou devant la rampe selon ce qui nous sera demandé par l'équipe encadrant les opérations. Notre fusée est modulaire et ainsi la case où se situe le réservoir est facilement détachable du reste ce qui facilite le remplissage.

SECU14 : Les systèmes pneumatiques ne doivent pas éjecter de pièces à l'extérieur de la fusée.

Notre système pneumatique sert à gonfler le ballon, celui-ci est ensuite détaché de la fusée avec sa nacelle, mais aucun élément n'est éjecté hors de la fusée.

III. Partie haute pression

La partie haute pression est constituée des éléments suivants :

- Réservoir haute pression
- Détendeur
- Système de remplissage
- Bouteille tampon d'hélium

III.1. Réservoir haute pression

Le réservoir utilisé est une bouteille de Paintball de la marque Stako.

- Pression maximum de fonctionnement à 15°C : 300bars
- Pression de test : 450bars
- Volume : 1,1L
- Masse : 0,75kg

Cette bouteille répond aux exigences du secteur du Paintball, à savoir légèreté et grande résistance étant donné l'utilisation qui en est faite. Elle est réalisée en matériau composite. Le certificat de conformité ainsi que de plus amples spécifications sont fournis en annexe de ce dossier. C'est cette même bouteille qui avait été utilisée dans le projet Iness.

Cette bouteille sera remplie par de l'hélium à 200bars maximum.

Etant initialement prévue pour contenir de l'air comprimé et non pas de l'hélium, il nous a fallu nous assurer qu'elle était bien étanche à ce gaz. Nous avons donc mesuré l'évolution de sa masse au fil des jours après un remplissage complet. Au bout d'une semaine aucune différence n'était constatée.

La bouteille est maintenue par-dessous et par-dessus par deux bagues conçues pour épouser la forme du réservoir. Ainsi, en rajoutant des cales pour la bloquer en rotation, elle est parfaitement bien maintenue dans sa case indépendante, et ne risque pas de se cogner contre le métal ou le plastique pendant le vol, ce qui pourrait endommager sa structure.



III.2. Détendeur

La fonction détendeur est assurée par le « preset », élément du secteur du Paintball (marque P3) qui se visse directement sur la bouteille. Celui-ci ramène la pression à 50 bar en sortie. Il dispose aussi d'un manomètre pour mesurer la pression dans la bouteille et d'un embout de remplissage pour remplir celle-ci avec une bouteille tampon au moyen d'une station de remplissage. Enfin il comprend aussi une soupape de sécurité.

- Pression d'entrée : 310 bar maximum
- Pression de sortie : 50 bar



III.3. Système de remplissage

Le système de remplissage utilisé est un équipement de Paintball, conçu pour s'adapter à l'embout de remplissage présent sur le preset introduit précédemment. De l'autre côté, il se connecte à une bouteille tampon d'hélium. Etant initialement prévu pour se connecter à une

bouteille d'air comprimé, nous avons introduit un raccord (commandé dans un magasin de matériel de plongée) entre le système de remplissage et la bouteille tampon d'hélium.

- Pression de service maximale : 310 bar.
- Pression d'utilisation pour notre projet : 200 bar.



III.4. Bouteille tampon d'hélium

La bouteille tampon utilisée est fournie par Air Liquide. Celle-ci doit être transportée verticale et il est recommandé de l'attacher à l'aide d'une sangle ou d'une chaîne quand cela est possible.

IV. Partie basse pression

La partie basse pression, où l'hélium circule à 50 bar, est composée des éléments suivants :

- Tuyauterie pour acheminer l'hélium
- Vanne manuelle de coupure en sortie de détendeur
- Vanne manuelle de purge
- Vanne commandée par l'électronique
- Système de déconnexion rapide
- Ballon

La pression de 50 bars a été choisie pour pouvoir gonfler rapidement le ballon (l'opération doit se faire en vol donc rapidement).

IV. 1. Tuyauterie

Les éléments de tuyauterie utilisés pour relier les différents éléments entre eux sont :

- Soit des éléments du secteur du Paintball, donc certifiés pour les pressions mises en jeu
- Soit des éléments achetés en concertation avec une personne de chez Faure automatisme, spécialiste des systèmes pneumatiques sur Lyon.

Les éléments concernés sont les tuyaux plastique en PFA, les raccords tuyau/tuyau et tuyau/vanne et autres petites pièces.



IV.2. Vanne manuelle de coupure en sortie de détenteur

Cette vanne est un élément du secteur de Paintball (marque Custom-Products), prévue pour résister largement à notre pression de 50 bars. Elle se connecte directement en sortie du détenteur et permet de couper le passage de l'hélium vers le circuit aval. Elle sera actionnable depuis l'extérieur de la fusée par un système de tirettes. C'est une sécurité supplémentaire à la vanne de purge.



III.3. Vanne de purge

La vanne de purge manuelle utilisée est une vanne haute pression H-800S-SS-L-1/4-T de la marque Ham-Let. C'est une vanne 3 voies, qui permet le passage de l'hélium vers le système aval dans une position et la purge dans l'autre position.

- Type : quart de tour
- Pression maximale admise : 206 bar à 38°C, 172 bar à 150°C

Des spécifications complémentaires sont disponibles en annexe.



IV.4. Vanne commandée

La vanne commandée sert à enclencher le gonflage du ballon au moment désiré, c'est-à-dire pendant le vol, une fois le bloc moteur séparé, sous parachute.

La commande est réalisée par un servomoteur qui l'actionnera au moment opportun. Nous avons choisi le servomoteur (Hitec HS-985-MG) pour qu'il puisse exercer un couple suffisant pour ouvrir la vanne quand le système est sous pression.

La vanne est une vanne haute pression H-700-SS-L-1/4-T-LD de chez Ham-Let. C'est une simple vanne deux voies.

- Type : quart de tour
- Pression maximale admise : 138 bar à 38°C, 90 bar à 100°C



IV. 5. Système de déconnexion rapide

Le système utilisé est un système « quick-disconnect » qui provient du secteur du paintball (marque Custom-products). Il permet (avec un système de billes) de maintenir deux tuyaux entre eux sauf si le système est actionné (une partie du système est mise en translation par rapport à une autre), les deux tuyaux étant alors libres de se séparer.

Ce système sera actionné par un servomoteur (Hitec HS-985-MG) au moyen de quelques éléments mécaniques supplémentaires.



IV.6. Ballon

L'enveloppe utilisée est une enveloppe en Mylar (aluminium) de type ballon de fête foraine. Le ballon, en forme de dirigeable, dispose d'un système anti-retour pour qu'il ne se dégonfle pas une fois séparé du reste de la fusée. Ce ballon sera de couleur argentée pour qu'il soit plus facilement repérable dans le ciel.

Nous avons fait plusieurs gonflages du ballon pour vérifier qu'il résistait bien à un gonflage à 50 bars. Même si la pression est élevée le débit reste faible vu le diamètre du tuyau, ainsi le souffle appliqué à l'enveloppe n'est pas trop important. Bien entendu le gonflage se fait à 50 bar mais la pression à l'intérieur du ballon est égale à la pression atmosphérique à tout instant (détente).

Le ballon, prévu pour être gonflé à l'hélium, est d'une bonne étanchéité. Il est resté en l'air plusieurs jours après gonflage. Il est conçu pour rester bien gonflé pendant plusieurs semaines. De toute façon notre expérience impose une descente au sol rapide, ce facteur n'intervient donc pas ici.

La nacelle du ballon sera solidement attachée à l'aide de colle et d'adhésif, pour ne pas qu'elle s'en détache lors de l'expérience, à cause des chocs et du vent auxquels le système sera soumis.



IV.7. Fixation des éléments

Etant donnée la pression mise en jeu et les efforts qu'elle implique sur les éléments du système, nous avons veillé à fixer solidement chaque composant. Nous avons réalisé des cales en aluminium sur mesure pour les éléments concernés, cales que nous avons vissées sur la bague dite « bague pneumatique ».

Pour ce qui est du raccordement des éléments entre eux, nous avons suivi les conseils du représentant de Faure automatisme pour le serrage et autres opérations (téflon pour la jointure par exemple).

Dans un aspect sécurité des personnes, la peau en polycarbonate, épaisse et résistante, protégera l'entourage de la fusée d'une éventuelle rupture d'un élément du système (déconnexion intempestive d'un tuyau, rupture d'un raccord, etc.).

V. Mise en œuvre

Dans cette section nous allons présenter dans un premier temps notre méthode de remplissage de la bouteille embarquée, puis certains éléments de chronologie.

V.1. Remplissage de la bouteille

La procédure est la suivante :

- Connexion du raccord de remplissage à la bouteille tampon
- Connexion du raccord de remplissage à la bouteille embarquée
- Ouverture du robinet de la bouteille tampon d'hélium (lentement)
- Attente de la fin du remplissage (équilibre des pressions)
- Fermeture du robinet de la bouteille tampon
- Purge de l'hélium contenu dans le raccord de remplissage

- Déconnexion du raccord de remplissage de la bouteille embarquée, puis de la bouteille tampon

Cette procédure est la même que la bouteille embarquée soit vide ou partiellement vide. La procédure ne peut se faire qu'avec la case bouteille préalablement séparée du reste de la fusée. On effectuera si possible le remplissage en extérieur, avec la bouteille tampon attachée.

V.2. Eléments de chronologie

La manipulation du système haute pression étant délicate, la chronologie accordera plusieurs points à celle-ci. En voici quelques exemples, résumés.

- La vanne manuelle qui sépare la sortie du détendeur au reste du système ne sera ouverte qu'une fois la fusée mise en rampe.
- La vanne commandée restera ouverte même après la séparation du ballon, afin qu'il ne reste plus d'hélium dans la bouteille à l'atterrissage, pour sécuriser la récupération.
- Seules certaines personnes seront habilitées à manipuler la fusée à la récupération, personnes qui devront bien connaître le système pneumatique, et qui seront notamment chargées d'ouvrir la vanne de purge de la bouteille, par sécurité.

V.3. Commande des systèmes

Une fois la fusée en rampe et l'électronique embarquée de la fusée mise sous tension, des interrupteurs permettront à tout moment (même si le jack est arraché par inadvertance) d'actionner les servomoteurs du système. Des leds permettront à tout moment de connaître l'état de ces servomoteurs.

Dans un but de sécurisation du système, un signal sonore sera émis avant toute action des servomoteurs du système pneumatique (ouverture de la vanne commandée et séparation du ballon, ainsi que séparation du bloc moteur), pour laisser le temps aux personnes à côté d'intervenir si jamais l'action des servomoteurs n'est pas désirée.

Annexes :

- Datasheet bouteille
- Datasheet vanne purge
- Datasheet vanne commandée
- Certificats de sécurité des vannes Ham-Let

- Certificats de sécurité des raccords Ham-Let

Remarque : à part pour la bouteille embarquée, il n'a pas été possible d'obtenir des datasheets et certificats pour le matériel de paintball utilisé (détendeur, vanne de coupure et système, système de remplissage et système quick-disconnect). Néanmoins étant vendus au grand public par des établissements français, tous ces équipements se doivent de respecter la norme PI, norme française en usage pour les équipements sous pression transportables.